

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки

(повна назва факультету / інституту)

Кафедра мікроелектроніки

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 20__ р.

Дипломний проект
на здобуття ступеня бакалавра
з напрямку підготовки 6.050801. «Мікро- та наноелектроніка».
(код і назва)

на тему: «Кремнієві фотоелектричні перетворювачі для космічних апаратів».

Виконав (-ла): студент (-ка) 4 курсу, групи 6.050801
(шифр групи)

Бондарь Поліна Степанівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник Якименко Юрій Іванович, доктор технічних наук, професор.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант з технологічних питань Івашук Анатолій Васильови, доц., к.т.н.,
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., к.т.н., Орлов А. Т.
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Консультант з інформаційних питань ст. викл., к.т.н. Діденко Ю. В.
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень
з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

[illegible]

				ДП ХХХХ 00.000.00		
	ПБ	Підп.	Дата			
Розробн.				Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівн.					1	1
Консульта.					НТУУ «КПІ» Каф. <u>МЕ</u> Гр. <u>ДП-</u>	
Н/контр.	Орлов А. Т.					
Зав.каф.	Борисов О.В.					

**Пояснювальна записка
до дипломного проекту**

на тему: _____

Київ – 20__ року

Реферат

Пояснювальна записка до бакалаврської дипломної роботи містить 63 сторінки, 25 рисунків, 6 таблиць, 19 бібліографічних найменувань.

Високоєфективні фотоперетворювачі на сьогоднішній день викликають великий інтерес, зі сторони тих, хто розробляє космічну техніку (і не тільки), як джерела енергії.

В даній роботі розглянуті сонячні батареї на кремнієвих сонячних елементах, їх параметри та стандарти. Досліджено принцип дії кремнієвих фотоперетворювачів. Досліджувались фотовольтаїчні та спектральні характеристики фотоелектричних перетворювачів, їх конструкція, та вплив її оптимізації на досліджені характеристики.

Метою дослідження є розробка фотоелектричного перетворювача на кремнії, високої радіаційної стійкості з ККД вище 18%.

Об'єктом дослідження роботи є виготовлені зразки кремнієвих ФЕП з радіаційною стійкістю.

Предметом дослідження є фотоелектричні та спектральні параметри, та виготовлених кремнієвих ФЕП.

У першому розділі було проаналізовано вплив фізичних факторів, що впливають на ефективність перетворення випромінювання, послідовного та шунтуючого опорів на вихідну потужність, параметрів кремнію та емітерного шару на ефективність ФЕП.

У другому розділі розглянуто вплив радіаційного випромінювання та космічного середовища на сонячні елементи.

У третьому розділі розглянуто технологію виготовлення ФЕП на основі монокристалічного кремнію та процес дифузії фосфору для моно- та мультикристалічного кремнію.

У четвертому розділі представлені вольт-амперні характеристики та характеристики спектральної чутливості досліджуваних ФЕП. Проаналізовані отримані дані та отримані результати

По результатам проведених досліджень, були зроблені висновки, щодо покращення ефективності перетворення сонячного випромінювання, за рахунок удосконалення технології виготовлення ФЕП та розширення спектральної чутливості.

Ключові слова: р-п-перехід, спектральна чутливість, кремнієвий фотоперетворювач космічного призначення, коефіцієнт корисної дії, радіаційна стійкість.

Abstract

Explanatory note to the bachelor thesis contains 63 pages, 25 drawings, 6 tables, 19 bibliographic names.

The high-performance photo-converters to date are of great interest, from the side of those who develop space technology (and not only) as energy sources.

In this paper solar cells on silicon solar cells, their parameters and standards are considered. The principle of the action of silicon photoconductors is investigated. Photovoltaic and spectral characteristics of photovoltaic converters, their design, and the effect of its optimization on the investigated characteristics were investigated.

The purpose of the study is to develop a photovoltaic converter on silicon, high radiation resistance with an efficiency of above 18%.

The object of the research work is the production of samples of silicon photoelectric converter with radiation resistance.

The subject of the study is photoelectric and spectral parameters, and made of silicon photoelectric converter.

In the first section, the influence of physical factors on the efficiency of the transformation of radiation, serial and shunt resistances on output power, the parameters of silicon and the emitter layer on the efficiency of the photoelectric converter was analyzed.

The second section deals with the influence of radiation radiation and space environment on solar cells.

The third chapter deals with the technology of manufacturing photoelectric converter based on monocrystalline silicon and the process of diffusion of phosphorus for mono- and multicrystalline silicon.

The fourth section presents the volt-ampere characteristics and characteristics of the spectral sensitivity of the investigated photoelectric converter. The obtained data and obtained results are analyzed

According to the results of the research, conclusions were made regarding the improvement of the efficiency of the transformation of solar radiation, due to the improvement of the technology of manufacturing photoelectric converter and the expansion of spectral sensitivity.

Key words: p-n-junction, spectral sensitivity, silicon photoconverter of space designation, efficiency coefficient, radiation stability.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ ТА СКОРОЧЕНЬ		
ВСТУП		
1. ВЛИВ ФІЗИЧНИХ ФАКТОРІВ НА ФЕП		
	1.1. Характеристики випромінювання	
	1.2. Сонячна батарея на кремнієвих сонячних елементах	
	1.3. Аналіз факторів, що впливають на ефективність перетворення і визначення основних фізико-топологічних параметрів структури ФЕП	
	1.4. Вплив послідовного та шунтуючого опорів на вихідну потужність кремнієвого сонячного елемента	
	1.5. Аналіз фізико-технологічних факторів, що впливають на фотоелектричні характеристики ФЕП	
	1.6. Вплив параметрів кремнію	
	1.7. Вплив параметрів емітерного шару	
2. ВПЛИВ РАДІАЦІЇ НА СОНЯЧНІ ЕЛЕМЕНТИ, ОСОБЛИВОСТІ ЇХ РОБОТИ В КОСМОСІ		
	2.1. Вплив вибору орбіти	
	2.2. Космічна радіація	
	2.3. Магнітне поле	
	2.4. Радіаційна деградація ФЕП	
3. КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ФЕП ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ		
	3.1. Конструкція ФЕП	
	3.2. Технологія виготовлення сонячних елементів на монокристалічному кремнії	
	3.3. Оптимізація процесів дифузії фосфору для моно- та мультикристалічного кремнію	
	3.4. Основні положення теорії дифузії в твердому тілі	
	3.5. Дифузія вглиб з поверхні сталої концентрації	
	3.6. Дифузія з обмеженого джерела	
	3.7. Дифузія фосфору при створенні електронно-діркового переходу для фотоелектричного перетворювача	
4. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕП		
	4.1. Методика дослідження параметрів СЕ	
	4.2. Дослідження фотовольтаїчних характеристик ФЕП	
	4.3. Дослідження спектральних характеристик ФЕП	
ВИСНОВКИ		
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ		

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ККД – коефіцієнт корисної дії.

СЕ – сонячний елемент.

ЗЗ – заборонена зона.

АМ – Air Mass.

ФЕП – фотоелектричний перетворювач.

КЗ – коротке замикання.

ВАХ – вольт-амперна характеристика.

ННЗ – неосновні носії зарядів.

ГЛОНАСС – глобальна навігаційна супутникова система.

МКС – міжнародна космічна станція.

УФ – ультрафіолет.

ВІМС – вторинно іонна мас-спектрометрія.

ВСТУП

Ідея застосувати енергію сонця за межами Землі з'явилась більше ніж пів століття тому. Сам космос є великим помічником в отриманні енергії, так як сонячні промені, що необхідні для процесу фотосинтезу в сонячних модулях, у надлишку є в космічному просторі та немає ніяких перешкод для їх споживання.

Високоєфективні фотоперетворювачі визивають великий інтерес, зі сторони тих, хто розробляє космічну техніку (і не тільки), як джерела енергії. Сонячні батареї широко використовуються та мають подальшу перспективу у використанні поза межами Землі.[1]

На даний час сонячні батареї займають домінуюче положення серед інших джерел автономного живлення. Сонячні батареї використовуються для того щоб жити енергією апаратуру супутників та систем космічних кораблів і станцій.

Існують базові матеріали, які використовуються для ФЕП, це – кремній (Si) та арсенід галій (GaAs). Сонячні елементи розроблені на базі GaAs мають деякі переваги, перед СЕ розробленими з кремнію, але не дивлячись на це, кремній і на далі залишається головним матеріалом фотовольтаїчної енергетики. Переважно, це пояснюється тим, що його використання більш доцільне у випадку недорогих комерційних проектах і якщо використання не передбачає терміне більше декількох років. У всіх інших випадках більш доцільно використовувати більш серйозні гетероструктури. Отже перевагами кремнієвих приладів є те, що фінансові затрати будуть меншими, ніж для аналогічних випадків, а це є актуально для використання, що не передбачає довгого терміну.

Робота в космосі сонячних елементів вимагає розгляд незвичайних умов експлуатації, та удосконалення конструкції вже відомих нам сонячних батарей, підвищення їх ефективності та корегування технології виготовлення.

Необхідно враховувати дуже багато факторів, які мають вплив на сонячні елементи та зменшують час і ефективність їх роботи. Таким чином необхідно вивчити та проаналізувати навколишній вплив у космосі та внутрішні процеси які відбуваються. Для ефективного використання сонячних елементів на кремнії необхідно максимально використовувати сонячну енергію, тобто більш ефективно використовувати спектр сонячного випромінювання, включаючи ультрафіолетовий спектр. На Землі УФ спектр затримується атмосферою, а в космосі – ні. Тому щоб у космосі ефективно перетворювати більш широкий спектр випромінювання(включаючи УФ спектр), як правило треба формувати СЕ за технологією з мілко залягаючим *p-n*-переходом.

1. ВЛИВ ФІЗИЧНИХ ФАКТОРІВ НА ФЕП

1.1. Характеристики сонячного випромінювання

Сонячне випромінювання можна характеризувати декількома важливими параметрами: інтенсивністю та спектральним складом світла.

Інтенсивність – це потужність сонячної енергії, що надходить на поверхню, яка поглинає промені. Середнє значенням потужності випромінювання, або ще його називають сонячною сталою, складає приблизно 1373 Вт/м^2 . Цей параметр дуже вагомим, бо краще за все характеризує випромінювання Сонця.

Спектральний склад світла характеризує випромінювання. Для його характеристики створили поняття «повітряної маси» («Air Mass» - AM), AM0, AM1, AM1.5, кожне значення відповідає окремому спектру:

AM0 – спектральний склад, що відповідає спектру сонячного випромінювання за межами Земної атмосфери;

AM1 – спектральний склад, що відповідає спектру сонячного випромінювання на поверхні Землі, а Сонце у момент визначення знаходиться на точкою спостереження.

AM1.5. – спектральний склад, що відповідає спектру сонячного випромінювання в наземному просторі, у свою чергу умовою спостереження є проходження випромінювання через атмосферу приблизно під кутом в 48° .

Спектри сонячного випромінювання на поверхні Землі AM1.5, а також за межами атмосфери AM0, зображені на рис.1.1. [10]

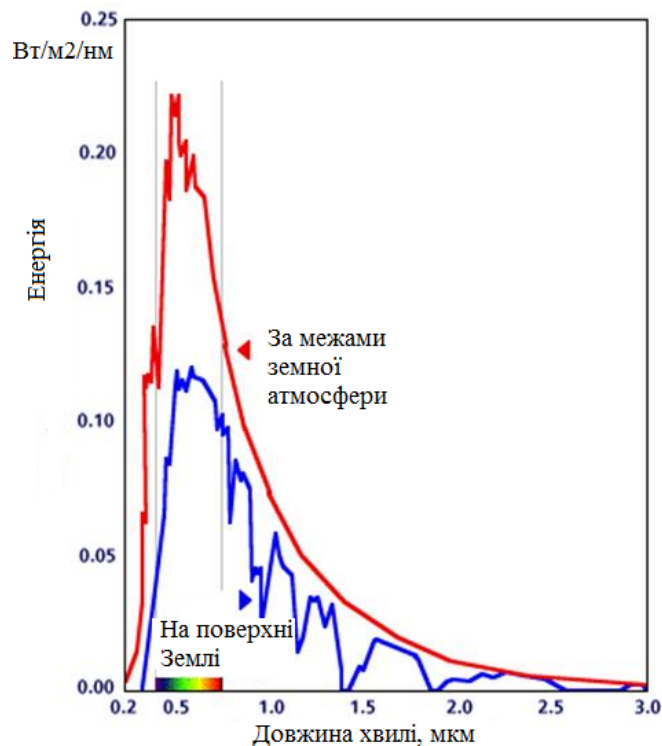


Рисунок 1.1. – Спектр випромінювання Сонця на орбіті та на поверхні Землі.[10]

1.2. Сонячна батарея на кремнієвих сонячних елементах

Бортові системи космічних апаратів потребують фотоелектричних перетворювачів, щоб мати енергозабезпечення, та кожного року вимоги до цих перетворювачів, зростають. Причиною є те, що космічні апарати вдосконалюють, та їх бортові системи також, тому необхідно забезпечити, щоб ФЕП мали кращі енергетичні та експлуатаційні характеристики. Для цього необхідно домогтися підвищення ефективності, підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД), підвищення радіаційної стійкості, що в результаті продовжить термін експлуатації.

Основними базовими матеріалами для фотоелектричних перетворювачів, використовують кремній, GaAs та гетероструктури на основі сполук A_3B_5 . Не дивлячись на те, що кремнієві ФЕП мають гірші експлуатаційні характеристики, ніж арсенідгалієві, кремній продовжує залишатись головним матеріалом фотовольтаїчної сонячної енергетики. Це обумовлено тим, що

кремній має широку розповсюдженість вихідної сировини, а також розвинутою технологією виготовлення самого матеріалу та приладів на його основі, що забезпечує значно меншу вартість кремнієвих ФЕП. Саме тому до сих пір проводять різноманітні дослідження, направлені на підвищення ефективності ФЕП із кремнію.(згідно результатів останніх років, можна стверджувати, що фізичні показники кремнієвих структур можна наблизити до аналогічних з A_3B_5). [11]

Актуальною задачею є збільшення кремнієвих ККД, тому що такі сонячні елементи використовуються набагато частіше на порівняно низьких орбітах. Ще у 60-ті роки ефективність кремнієвих сонячних батарей становила 11%. Зараз це значення становить близько 16-17%. Важливо відмітити, що кремнієві ФЕП, що мають меншу ефективність, навпаки є більш стійкими до радіаційного впливу.[12]

1.3. Аналіз факторів, що впливають на ефективність перетворення і визначення основних фізико-топологічних параметрів структури ФЕП

Ось вже декілька десятиків років конструкція фотоелектричного перетворювача істотно не змінюється (рис. 1.2.). Аналогічно до цієї конструкції виготовляють майже 75% усіх фотоелектричних перетворювачів на монокристалічному кремнії і майже 99% на мультикристалічному. Частку монокристалічних ФЕП виготовляють з метою для отримання «рекордних» рівнів ККД. По-перше це роблять, тому що збільшуючи рівень ефективності фотоелектричного перетворення не покриває ті витрати(включаючи енерговитрати для виробництва), які потрібні.

Підвищення ефективності фотоелектричного перетворення не змінюючи конструкцію, можна досягнути:

- 1) Оптимізуючи параметри шарів ФЕП;

- 2) Узгодити параметри шарів фотоелектричних перетворювачів;
- 3) Вдосконалити обладнання, яке використовують у технологічному циклі.

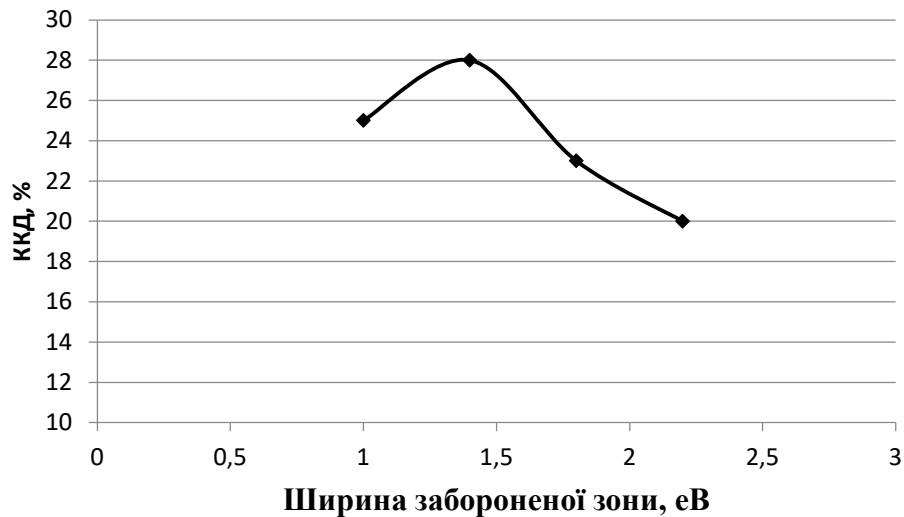


Рисунок 1.2. – Конструкція ФЕП на кристалічному кремнії [13]

Для того, щоб зробити меншу собівартість, потрібно зробити виробництво серійним та збільшити його об'єм.

Коефіцієнт корисної дії є основною і важливою складовою, що характеризує будь-який ФЕП. Теоретично можливий максимальний коефіцієнт корисної дії можна визначити враховуючи основні втрати (закон фотоелектричного ефекту, невикористання фотонів з енергією менше ніж ширина ЗЗ), у наближенні, що фотони приблизно з такою ж енергією, як і енергія ширини ЗЗ, будуть цілком брати участь у фотогенерації. Залежність ККД від ширини забороненої зони представлено на рис. 1.3.:

Розрахунки, що приведені в [14], дозволяють побудувати наступну залежність:



0

Рисунок 1.3 – Залежність максимального теоретичного ККД від ширини забороненої зони. [14]

Аналізуючи залежність, що приведена на рис. 1.3., максимальне значення коефіцієнта корисної дії можливе, якщо використати матеріал арсенід галію базовим матеріалом (ширина ЗЗ приблизно 1,4 еВ).

Але, враховуючи те, що необхідно зменшити собівартість фотоелектричного перетворювача для сонячної батареї, яка буде використовуватись для супутника, в ролі базового матеріалу буде застосовуватися кремній (ширина забороненої зони приблизно 1,12 еВ). Значення максимального коефіцієнта корисної дії для кремнію складає 27%. Основні параметри кремнію та їх значення:

- $I_{\text{кз}} = 44 \text{ мА/см}^2$ - щільність струму КЗ;
- $V_{\text{рк}} = 770 \text{ мВ}$ - напруга розімкнутого кола;
- $FF = 0,884$ - коефіцієнт заповнення ВАХ.

Перелік приведених параметрів ($I_{\text{кз}}$, $V_{\text{рк}}$, FF) дає можливість визначити коефіцієнт корисної дії фотоелектричного перетворювача, а також визначити, що саме призводить до зменшення ККД.

Сонячну енергію, що потрапляє на площину (поверхню) напівпровідника й освітлює його, можна розподілити на такі групи[14]:

- 1) Частина сонячної енергії, що перетворилася на електричну. Усереднене значення коефіцієнта корисної дії кремнієвих фотоелектричних перетворювачів, що мають площу більше 100 см^2 становить 17,5...18,5% (2018 р.);
- 2) втрати на відбивання від фотоактивної площі фотоелектричного перетворювача, що викликані тим, що неможливо створити оптичну систему на поверхні фотоелектричного перетворювача, що буде максимально поглинати світло в широкому діапазоні чутливості фотоелектричного перетворювача. На теперішній час уникають ці втрат приблизно на 2...5%, за рахунок антиблікових покриттів;
- 3) Втрати при відбиванні від фронтальної контактної системи. Фронтальна поверхня фотоелектричного перетворювача складається на 4...7% із контактної сітки, саме це визначає рівень втрат;
- 4) Поглинання, що є нефотоактивним – становить приблизно 1%;
- 5) Енергія фотону менша за ширину ЗЗ антиблікового покриття – приблизно 19%;
- 6) Енергія фотону, більша за ширину ЗЗ – приблизно 30%;
- 7) Збирання фотогенерованого заряду – 4...5%;
- 8) Рекомбінаційні явища, що залежать від діодної структури фотоелектричного перетворювача – приблизно 20%;
- 9) Втрати, що виникають коли прикладають робочу напругу – приблизно 5%.

Щоб отримати найбільше значення коефіцієнта корисної дії, потрібно щоб значення напруги розімкнутого кола ($V_{\text{рк}}$), струму короткого замикання ($I_{\text{кз}}$) та коефіцієнта заповнення ВАХ (FF).

Насправді значення шунтуючих та послідовних опорів фотоелектричного перетворювача впливають на коефіцієнт заповнення ВАХ.

1.4. Вплив послідовного та шунтуючого опору на вихідну потужність кремнієвого сонячного елемента

Щоб визначити, як саме впливають внутрішні опори на ВАХ фотоелектричного перетворювача, доцільно аналізувати темнову та світлову ВАХ. [7]

Світлова характеристика (рис.1.4), що розташована в I квадранті та в IV квадранті, складають пряму лінію, де; 1 – світлова ВАХ, 2 – темнова ВАХ. Послідовний опір сонячного елемента можна характеризувати аналізуючи нахил прямої до осі струму:

$$R_{ser} = \Delta U_{прм} / \Delta I_{прм}, \quad (1.1)$$

де: $\Delta U_{прм}$ та $\Delta I_{прм}$ вимірюються в області, що близька до напруги холостого ходу.

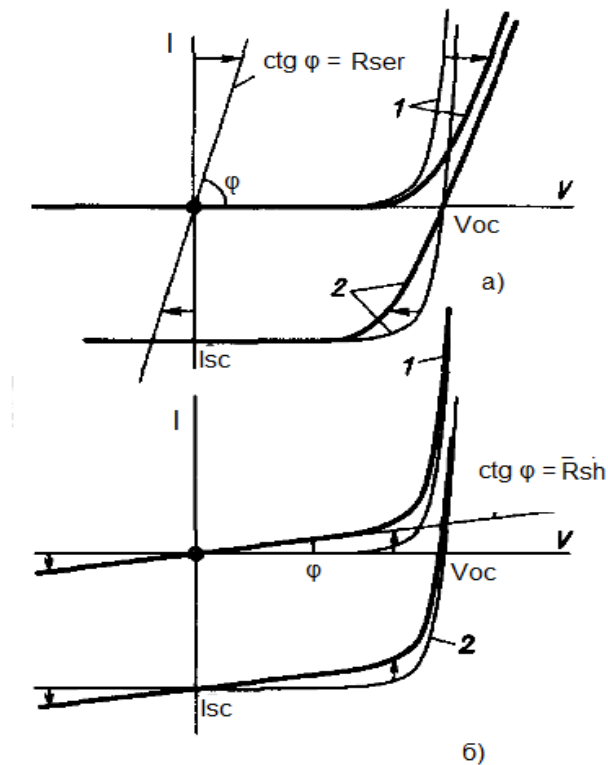


Рисунок 1.4. – Вплив послідовного (а) та шунтуючого (б) опорів на ВАХ кремнієвого сонячного елемента. [7]

Внаслідок того, що на ВАХ при освітленні нахил прямої знаходиться поряд точки струму короткого замикання ($I_{кз}$), отримати значення проблематично, а отримати значення R_{sh} можливо аналізуючи нахил ВАХ при відсутності освітлення:

$$R_{sh} = \Delta U_{звор} / \Delta I_{звор} . \quad (1.2)$$

ВАХ у відсутності освітлення отримує схоже значення, що фотострум, це обумовлюється тим, що ВАХ характеризує потужність віддану елементом, а точніше, ту енергію, що використовується як електрична енергія і характеризую частку теплових втрат.

Струм короткого замикання ($I_{кз}$) та фотострум (I_{Φ}), що генерує сонячне випромінювання ,рівні у тому випадку, коли фотоелектричний перетворювач правильно виготовлений. Виходячи з цього, що майже усі електрон-діркові пари, що згенерувались, зробили внесок у струм навантаження.

Проаналізуємо втрати електроенергії на послідовному опорі. Для цього, розглянемо вираз повних втрат, і запишемо втрати енергії, що пов'язані з послідовним опором наступним чином:

$$\Delta_{SER} = I_M^2 \cdot R_{SER} / I_M \cdot V_M = I_M \cdot R_{SER} / V_M , \quad (1.3)$$

а з шунтуючим опором:

$$\Delta_{SH} = (V_M^2 / R_{SH}) / I_M \cdot V_M = V_M / R_{SH} \cdot I_M \quad (1.4)$$

Аналізуючи залежність, можна зробити висновок, що вони сприяють тому що коефіцієнт заповнення ВАХ зменшується:

$$\Delta_{FF} = 100 \cdot (1 - (\Delta_{SER} + \Delta_{SH})) \quad (1.5)$$

1.5. Аналіз фізико-технологічних факторів, що впливають на фотоелектричні характеристики ФЕП

Фізико-технологічні чинники, що мають вплив на фотоелектричні характеристики (враховуючи принцип роботи фотоелектричного перетворювача на n^+p - переході):

- 1) За рахунок легування отримуємо зсув електро-хімічного потенціалу в приповерхневій області пластини Si;
- 2) Глибина залягання переходу в емітері, легуюча домішка, та її концентрація біля фронтальної сторони;
- 3) Швидкість рекомбінації на поверхні неосновних носіїв зарядів (ННЗ) на тильній та фронтальній сторонах пластини;
- 4) Дифузійна довжина ННЗ в базовому шарі;
- 5) Товщина пластини, а саме базового шару.

V_D - це висота потенційного бар'єра для основних носіїв заряду, таким чином визначають, яка величина електричного поля всередині, що прискорює неосновні носії заряду:

$$E_{\text{внутр}} = V_D / w_d \quad (1.6)$$

Де, w_d – шириною збідненого шару n^+p – переходу.

Ширина збідненого шару w_d , величина внутрішнього електричного поля $E_{\text{внутр}}$ та бар'єр V_D у свою чергу залежать від таких параметрів матеріалу, як рівень легування пластини і режим дифузії фосфору.

Режим для дифузії фосфору необхідно обирати щоб створити емітерний шар, він також визначає глибину (x_j) p - n -переходу та поверхневу концентрацію (C_s). Підбір режиму не є легкою фізико-технологічною задачею, бо да глибини переходу і поверхневої концентрації висувають протилежні вимоги, а саме:

Для того щоб зменшити R_K перехідний опір контакту Ag/n^+Si потрібно збільшити рівень легування, на це впливає час чи температура дифузії, в свою

чергу це приводить до того, що збільшується глибина залягання р-n-переходу. За умови $C_s \leq 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ вклад Оже-рекомбінації в S_n зменшується.

Відстань між поверхнею кремнієвої пластини та збідненого шару *n-p*-переходу визначається глибиною дифузії. Ширину збідненого шару (w_d) визначає концентраційний профіль розподілу домішки в пластині кремнію. Генерація носіїв заряду в збідненому шарі викликає появу фотоструму. Електричне поле в збідненому шарі є дуже великим і електрони та дірки, що виникли в результаті освітлення сонячним випромінюванням, виходять з цього шару, ще до рекомбінації між собою. V_{pk} і FF значно зменшуються, так як у збідненому шарі збільшується рекомбінація, причинами тому можуть бути комплекси вуглецю та кисню, що виникли в кремнії в результаті його термообробки при температурі більше 700°C , порушений шар кремнію, при формування фронтальної контактної системи проникнення срібла в збіднений шар, домішки(фонові) Cu^{++} , K^+ , Na^+ , Fe^{++} .

Число фотонів, що поглинається в збідненому шарі за одиницю часу дорівнює фотоструму (I_{dr}) цього шару і одиничному спектральному інтервалі. Не враховуючи фотострум електронів і дірок, можемо представити спектральний відгук(SP) наступним чином:

$$SP = I_{dr} / q F_\lambda, \quad (1.7)$$

де F_λ – щільність потоку падаючих фотонів в одиничному спектральному інтервалі.

Спектральний відгук визначається швидкістю того, як генерують електронно-діркові пари, зменшується по експоненті, якщо збіднений шар віддаляється від поверхні кремнію, для довгохвильового випромінювання ($\lambda > 1 \text{ мкм}$). набагато повільніше ніж для короткохвильового ($\lambda < 0,4 \text{ мкм}$).

Причому для випромінювання короткохвильового ($E > 2,5 \text{ eV}$ – енергія фотонів) можна підвищити SP в 2 рази, при зменшенні x_j – від 0,4 до 0,2 мкм, а C_s від $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ до $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Також те, на скільки глибоко дифундує фосфор, впливає на процес формування контактної металізації на тильній та фронтальній сторонах. Щоб набутися гранично малого значення перехідного опору R_k контактів Ag/n^+Si необхідно, щоб фронт дифузії Ag (срібла) пройшов відстань:

$$d_{авп} < L_{ag} < d_{авп} + x_j / 2 , \quad (1.8)$$

де $d_{авп}$ – товщина антиблікової плівки.

Це означає, що потрібно створити таку глибину фронту впалення срібла(враховуючи специфіку дифузії фосфору в кремній), щоб вона була не меншою половини глибини емітерного шару, для того щоб створити контакт з гранично малим опором.

Перехідний опір зросте, тоді як до збідненого шару буде досягнуто фронт дифузії срібла і це призведе до того, що FF і $V_{рк}$ будуть зменшуватись.

Розглянемо реальний фотоперетворювач з текстурованою поверхнею. Піраміди, що при цьому утворюються становлять $1,5 \dots 2$ мкм у висоту. Глибина $n^+ - p$ -переходу має анізотропний характер дифузії домішок, тому не є постійною величиною. Для текстурованої поверхні, емпірично підбирають режим відпалу металізації.

Швидкість поверхневої рекомбінації неосновних носіїв заряду на лицьовій поверхні кремнієвої пластини (S_n) залежить від поверхневої концентрації фосфору (при C_s більше ніж $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ різко зростає Оже – рекомбінація), вмісту фонових домішок Na^+ , K^+ , Fe^{++} , Cu^{++} , що створюють рівні рекомбінації в забороненій зоні кремнію, і наявності порушеного шару в приповерхневому шарі Si . Видалення порушеного шару Si шляхом хімічного травлювання, ефективна хімічна обробка і пасивація поверхні кремнію сприяють зниженню S_n і збільшенню $V_{рк}$ і $I_{кз}$.

Щоб знизити швидкість рекомбінації неосновних носіїв заряду на тильній стороні S_b і в результаті збільшити $V_{рк}$ і $I_{кз}$, потрібно ввести ізотипний перехід в конструкцію фотоприймача на основ Si , що є прозорим для деякої частини спектру.

Концентрація електрично активних дефектів, що створена рекомбінаційними рівнями в ЗЗ, впливає на дифузійну довжину пробігу неосновних носіїв заряду (L_n) в базі.

Це можуть бути дефекти, комплексів B_xO_y , SiO_x , $C_xB_yO_z$, що виникли в Si, який був вирощений методом Чохральського, як результат розпаду твердого розчину кисню в Si при термообробці, різного роду кластери дефектів, оточені хмарою фонових домішок, а також преципітати Cu^{++} , Fe^{++} , Zn^{++} та інші. Тобто на дифузійну довжину пробігу ННЗ можуть впливати параметри початкового Si, тип термообробки та їх кількість, те, яким є рівень забруднення при виготовленні фотоперетворювача. Обраний спосіб дифузії фосфору є принциповим. Під час дифузії фосфору паралельно відбувається очищення хлором СККС, що виготовляється, від іонів лужних металів за рахунок утворення вільного хлору в дифузійному реакторі:



Кварцовий реактор також проходить «хлорне» очищення від домішок Cu^{++} , Fe^{++} , Na^{+} .

Зменшення оптичних втрат, а саме зменшення коефіцієнта оптичного відбивання чистого Si можна досягти за допомогою створення текстури на поверхні (від 35% до 12%). Додаткове нанесення антиблікового покриття зменшує відбиття до рівня 4..5%.

Значення $I_{кз}$, і $V_{рк}$ зростають через зменшення відбиття світла і це в свою чергу збільшує ефективність перетворення.

Вплив товщини базової області (або d) на коефіцієнт корисної дії оцінюється шляхом зіставлення значень дифузійної довжини ННЗ, L_n і d . Звичайно, чим більше відношення L_n/d , тим вище ККД.

При $L_n = d$ можна отримати ККД = 19 %;

при $L_n = d/3$ ($L_n < d$ в три рази) ККД = 16 %;

при $L_n = d/6$ ($L_n < d$ в шість разів) ККД = 14 %.

Для узагальнення побудуємо схему, яка відображає залежність ефективності фотоелектричного перетворення ФЕП:

Таблиця 1.1. – Вплив фізичних процесів на ефективність фотоперетворення [14]

Збільшення ефективності ФЕП							
↑		Зменшення R_{ser} Збільшення V_{pk}	←	Збільшення N_d	→	Зменшення J_{sc}	
		Збільшення V_{pk}	←	Збільшення x_j	→	Зменшення J_{sc}	
		Збільшення J_{sc}	←	Наявність текстурованої поверхні	→	Збільшення R_{ser}	
		Збільшення V_{pk}	←	Зменшення N_a	→	Збільшення деградації ККД ФЕП	
	←	Збільшення V_{pk} Збільшення J_{sc}	←	Збільшення чистоти вихідного кремнію	→	Подорожчання вихідного матеріалу	↓
Зменшення ефективності ФЕП							

1.6. Вплив параметрів кремнію

Базовий шар, що є в ФЕП, являє собою робочим шаром, через те, що бере участь у роботі фотоперетворювача. Саме тому необхідно що зробити розрахунки структури, треба почати саме з базового шару.

Основні параметри кремнієвої вихідної пластини, що безпосередньо впливають на фотоелектричні параметри:

- 1) час життя ННЗ;

- 2) рівень концентрації вуглецю;
- 3) рівень концентрації кисню;
- 4) питомий об'ємний опір.

Більш детально необхідно зупинитися на питому опорі кремнієвої пластини, бо з іншими трьома параметрами все доволі зрозуміло, тобто:

- час життя ННЗ зростає, зростає й рівень ефективності фотоперетворення
- чим менший рівень бору та кисню, тим зменшується вірогідність того, що утворюються комплексів бор-кисень, що призведуть до деградації параметрів, тим вищий потенціал по якості та надійності [15]

А от оптимальним питомим опором кремнієвої пластини виникають досить суперечливі вимоги.

Послідовний опір та фактор заповнення ВАХ ФЕП. З позиції цього параметру потрібно зменшувати опір пластини, щоб відбулося зменшення складової, що додається до послідовного опору фотоперетворювача.

Напруга розімкнутого кола ФЕП. З позиції цього параметру необхідно зменшувати питомий опір пластини, так як це відбувається шляхом збільшення концентрації акцептору (концентрація бору не більше $10^{16} \dots 10^{17} \text{ см}^{-3}$).

1.7. Вплив параметрів емітерного шару

При розрахунку використані вирази, наведені в [14], при цьому значення змінних взяті типові для сучасних великогабаритних ФЕП на кристалічному кремнії.

Освітлення що є фотоактивним поглинається в напівпровіднику повністю, коли виконується умова: $d \ll L$ де d – товщина ФЕП, L – довжина дифузії електрон-діркових пар в базі (досягається профілюванням або текстуруванням однієї або обох поверхонь ФЕП).

Функція генерації електронно-діркових пар можна описати виразом:

$$g(x) = \frac{J(e^{-fx} + R_d e^{fx-2fd})}{1 - R_0 R_d e^{-2fd}} \dots (1.10)$$

де: ξ - коефіцієнт поглинання світла;

J -інтенсивність світла, що пройшло в напівпровідник;

R_0 і R_d – коефіцієнти відбиття від фронтальної та тильної поверхонь ФЕП вглиб напівпровідника(повне внутрішнє відбиття світла $R_0 = R_d = 1$.).

Розглянемо базу p -типу з однаковими концентраціями дірок(p_0) та електронів(n_0). Фронтальний контакт - гребінка струмоз'ємних металічних смуг площею A_k , що нанесені на n^+ -область, паралельно як повна площа фотоперетворювача дорівнює A . Припустимо, що контактна сітка є щільною та збирає струм без втрат. Обмежимося при цьому одномірною моделлю. Товщина n^+ -області та концентрація електронів дорівнюють - x_j і N . Тильний контакт p^+ , що має концентрацію p є повністю металізованим.

Об'ємні механізми рекомбінації. При розрахунках приймаємо до уваги механізми рекомбінації в базі:

- випромінююча міжзонна рекомбінація;
- рекомбінація Шоклі – Ріда – Холла;
- міжзонна рекомбінація Оже.

Виходячи з наближення $d \ll L$ надлишкова концентрація електронів в базі $\Delta n(x) \approx \text{const}$ (тобто не залежить від координати). Для темпу об'ємної рекомбінації R_v буде справедливим вираз:

$$R_v = \Delta n d \{ \tau_r^{-1} + A_i(p_0 + \Delta n) + B_p(p_0 + \Delta n)^2 + B_n(p_0 + \Delta n)\Delta n \}, \quad (1.11)$$

де: τ_r – час життя при рекомбінації Шоклі-Ріда-Холла;

A_i , B_p , B_n – константи міжзонної випромінюючої рекомбінації та міжзонної рекомбінації Оже для дірок і електронів.

Під час розрахунку використовувались значення:

$$A_i \approx 3.3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1},$$

$$B_p \approx 10^{-31} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1},$$

$$B_n \approx 2.8 B_p.$$

Враховуючи генераційно-рекомбінаційні механізми, для досліджень (та отримання ФЕП з високим значенням ККД) обираємо діапазони:

- поверхневої концентрації донорної домішки $N = 5 \cdot 10^{19} \dots 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$;
- глибини залягання n^+ - p -переходу $x_n = 0,2 \dots 0,5 \text{ мкм}$.

Враховуючи, що реальні ФЕП мають поверхневу концентрацію, що рівна $(1,5 \dots 2,3) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, та відповідає діапазонам поверхневого опору $40 \dots 100 \text{ Ом}/\square$, і положенням, щодо затухання світла на вільних носіях заряду, зменшення концентрації в емітерному шарі можна вважати одним з шляхів досягнення високої ефективності ФЕП, з реальною перспективою розширення спектральної чутливості.

Виходячи зі спектру сонячного випромінювання АМ1. Очевидно, що найбільшої ефективності фотоперетворення можна досягти, при використанні частини спектра - $0,38 \dots 0,6 \text{ мкм}$.

Спочатку потрібно сформулювати емітерний перехід з відповідною спектральною характеристикою. Для цього проведено експериментальне дослідження з такими вихідними умовами:

1. Вихідна пластина: монокристалічний кремній марки КДБ, питомий опір $1,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (що є середньостатистичним значенням для кремнієвих пластин у серійному виробництві ФЕП на кристалічному кремнії).

2. Текстурована поверхня пластини (стандартний режим в 2% водному розчині NaOH, 7% - пропанолу).

3. Хімічна обробка (10% HCl, при 65°C , деіонізована вода, 10% HF, деіонізована вода).

Дифузія фосфору. Враховуючи те, що для збереження ефекту гетерування, значне скорочення тривалості процесу дифузії, є небажаним, було проведено формування емітерного шару, при різних температурах технологічного процесу, з отриманням різного значення питомого поверхневого опору (в діапазоні $20 \dots 100 \text{ Ом}/\square$).

Потім проводилось травлення фосфорносілікатного скла і n -шару з однієї сторони пластини (щоб забезпечення контактування з p -шаром). Стравлювання проведено плазмохімічним травленням в установці плазмохімічної обробки.

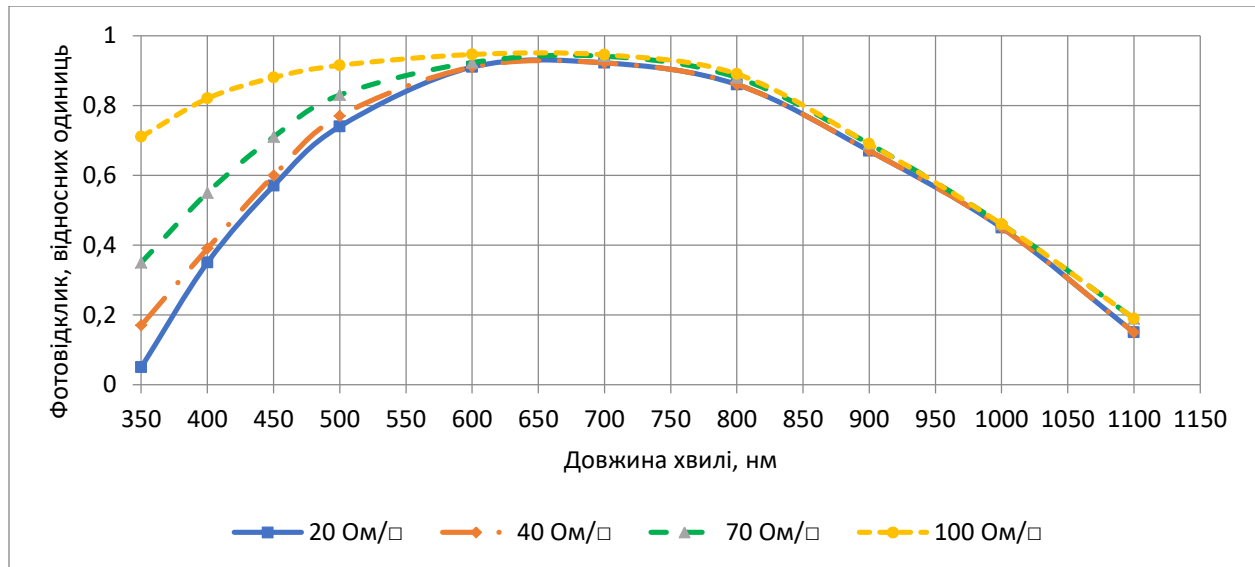


Рисунок 1.5 – Спектральна характеристика ФЕП при різних значеннях питомого поверхневого опору емітерного шару.

Результати вимірювань фотовідгуку представлені на рис.1.5. Очевидно, що є значний приріст чутливості ФЕП в короткохвильовій частині спектру АМ1.5.

Антиблікове покриття з мінімальним рівнем коефіцієнта відбиття на довжині хвилі близько 0,6 мкм необхідне для того, щоб отримати максимальну ефективність.

Висновки:

Сонячні елементи є дуже важливими у використанні для живлення космічних апаратів. Не дивлячись на те, що розвиваються нові напрями, кремній все ще знаходить застосування в космічних системах.

В цьому розділі були розглянуті основні фізичні процеси що відбуваються в фотоелектричних перетворювачах. Визначенні чинники, за допомогою, яких можна підвищити ефективність фотоелектричного

перетворення, а саме за допомогою оптимізації параметрів шарів ФЕП, узгодження параметрів шарів між собою, вдосконалення обладнання. Визначено вплив фізико-технологічних параметрів на фотоелектричні характеристики, а також вплив параметрів самого кремнію та параметрів емітерного шару.

2. ВПЛИВ РАДІАЦІЇ НА СОНЯЧНІ ЕЛЕМЕНТИ, ОСОБЛИВОСТІ ЇХ РОБОТИ В КОСМОСІ

У космосі на фотоелектричні перетворювачі впливає дуже велика кількість різних чинників космічного простору: іони високої енергії, потоки електронів високої енергії, холодна і гаряча космічна плазма, електрично-магнітне випромінювання Сонця, метеорна матерія, «космічне сміття» та інші фактори. В результаті впливу в матеріалах і в елементах починають протікати різні процеси, що призводять до погіршення експлуатаційних параметрів

2.1. Вплив вибору орбіти.

Умови польоту, а саме висота орбіти космічного об'єкту, мають значний вплив на робочі характеристики сонячних елементів. В залежності від того, яким є завдання польоту, і обирають висоту орбіти. Єдиної класифікації цього параметра не можливо привести, але умовно поділяють орбіти по висоті, наступним чином:

Табл. 2.1 – Класифікація космічних орбіт [2]

Назва орбіти	Висота орбіти, км
Низькі навколоземні	До 800
Середньої висоти навколоземні	800 – 1200
Високі навколоземні	Більше 1200
Геосинхронні	35000

На орбітах, висота яких становить до 800 км, літають безпілотні супутники Землі, та супутники якими пілотують, космічні лабораторії, та космічні апарати зі спеціальним призначенням.

Орбіти космічних апаратів, що використовуються для вирішення наукових або прикладних задач, мають різні висоти та нахили відносно екваторіальної площини, значення приведені в табл (2.2.)

Таблиця 2.2. Характеристики орбіт з різними параметрами [3]

Орбіта	Висота, км	Нахил, рад
Орбіта МКС	350-400	51,6
Сонячно-синхронна орбіта	800-1000	98-100
Система ГЛОНАСС	19100	64,8
Геостаціонарна	35790	0

Сонячна-синхронна орбіта зручна тим, що забезпечує в кожен момент часу однакові умови освітлення земної поверхні, переважно використовується для проведеуня фотозйомок земної поверхні.

Космічні апарати, що знаходяться на геостаціонарній орбіті мають однакову кутову швидкість і постійно знаходяться над однією точкою, тим самим створюють умови для ретрансляції радіосигналів.

Орбіта ГЛОНАСС обрана для забезпечення високої точності вимірів координат об'єктів на земній поверхні і навколоземному просторі.

Знаючи висоту орбіти, можна проаналізувати й умови експлуатації сонячних елементів (і не тільки), оцінити можливий вплив космічної середи на матеріали та елементи, детальніше про це у наступних пунктах.

Тому далі ми будемо розглядати переважно фізичні характеристики космічного середовища в ОКП.

2.2. Космічна радіація

Потоки корпускулярної радіації, що вснують у космосі мають руйнівну дію на фотоелементи. Встановлено наявність таких частинов в космічному просторі: електронів, протонів, α -частинок, що захоплені магнітним полем Землі. В залежності від висоти польоту космічного апарату, він стикається з корпускулярним випромінюванням різного складу. Різні типи випромінювання та їх склад представлені в таблиці 2.3:

Таблиця 2.3 Склад космічного випромінювання від висоти орбіти [2]

Діапазон висот орбіти космічного апарату, км	Склад космічного корпускулярного випромінювання
0-250	Майже відсутнє
250-1600	Електрони і протони радіаційних поясів
1600-50000	Електрони радіаційних поясів, α -частинок сонячних спалахів
Вище 50000	Протони та α -частинок сонячних спалахів

У космосі енергія часток та щільність радіаційних потоків розподілені нерівномірно. Лише в двох місцях, що звуться радіаційними поясами Землі, відмічена найбільша щільність частинок, які виникають під дією магнітних полюсів нашої планети. Ці пояси виникають, через те, що електрони, протони та іони різних енергій захоплюються магнітним полем, і магнітосфера стає заповненою зарядженими частинками. Сумарність цих часток становить радіаційні пояси, що можна умовно розділити на зовнішні та внутрішні. Також можна виразити їх положення у просторі величиною L , що відповідає відстані до осі диполя що формує магнітне поле Землі. Радіаційні пояси є розміщеними симетрично відносно земної поверхні. В інтервалі $1,2 < L < 2,5$, знаходиться

внутрішній радіаційний пояс, а – до $L=8$ простягається зовнішній пояс. Між внутрішнім та зовнішнім поясами мається проміжок $L=2,5 \dots 3$, в цьому проміжку потік електронів мінімальний. Для зовнішнього поясу характерні зміни інтенсивності та розподілу частинок в просторі, що мають енергію електронів від keV-MeV та протонів з енергією до декількох MeV . Коли внутрішній радіаційний пояс є достатньо стабільним, та складається з електронів та протонів енергією більше 100 keV та 30 MeV відповідно.

Створення додаткових центрів рекомбінації є основним негативним впливом космічної радіації, це відбувається шляхом зміщення атомів напівпровідникового матеріала фотоперетворювача. Протони з енергією $4 \dots 40 \text{ MeV}$ та електрони - $0,2 \dots 1,0 \text{ MeV}$, викликають найбільший ефект. [2] Радіація що складається з протонів – є стабільною в часі. Просторовий розподіл потоків електронів і протонів не збігається.

В інших планет Сонячної системи також є радіаційні пояси. Біля Юпітера сильне магнітне поле, що створює інтенсивні потоки заряджених частинок. У внутрішньому поясі потоки електронів високих енергій, що майже відсутні в Земних поясах, і на декілька порядків менше, але присутні в зовнішньому поясі, обидва ці радіаційні пояси мають небезпечний вплив на сонячні елементи. Меркурій також володіє магнітним полем, воно є значно слабшим та не створює зон стабільного захоплення частинок. Особливістю магнітосфери Меркурія є те, що в ній зареєстровані потоки електронів, які мають енергію вище $0,3 \text{ MeV}$, а це перевищує фоновий рівень міжпланетного простору.

Спалахи на сонці, що супроводжуються викидом великої кількості протонів, породжують сонячне випромінювання, яке спричиняє радіаційну деградацію сонячних елементів космічного апарату. Це явище носить сезонний характер. В міжпланетному просторі сонячні промені становлять небезпеку. Поблизу Землі вони екранізуються магнітосферою планети. А ультрафіолетове випромінювання погіршує параметри елементів схеми та характеристики фотоперетворювачів.

2.3. Магнітне поле

Силові лінії магнітного поля землі, або геомагнітного поля, виходять із центра Землі.

Напруженість геомагнітного поля на висоті стаціонарної орбіти складає приблизно $1,38 \cdot 10^{-7}$ Тл (138 гамм). В міжпланетному просторі магнітне поле виникає через те, вплив сонячної плазми.

Вплив магнітних полів. Магнітні поля можуть впливати на системи, що відповідають за положення космічного апарата. Навть незначна зміна механічних та електрофізичних властивостей кремнія під дією зовнішніх факторів стає значною. Наявність остаточного магнітизму або токових контурів приводить до того, що власне магнітне поле космічного апарату взаємодіє з зовнішнім (магнітним полем Землі), в результаті цього виникає момент сил, що діють на апарат. Частіше всього це явище не є бажаним, тому електричні кола сонячних батарей розташовують таким чином, щоб не виникало сил взаємодії. [9]

Основними складовими, що діють на СЕ в іоній сфері і магнітосфері землі, є потоки газа, плазми та електромагнітного випромінювання. Тому проблемою взаємодії СЕ з цією середою є близькою до проблеми взаємодії матеріалів елементів конструкцій космічних апаратів. Наприклад інтегральна взаємодія комплексу факторів навколосупутникової середи призводить до зміни електричної потужності сонячних елементів.

Також основними факторами, що мають вплив на сонячні батареї – це іонізуюче випромінювання, радіаційна електризація, сонячне УФ випромінювання.

Радіаційна електризація сонячних батарей – радіаційно-стимульовані пробої з викидом заряду в навколишнє середовище, руйнують і забруднюють захисне скло. Втрати потужності через забруднення захисного скла в результаті радіаційної електризації приблизно складають 31 % [4]

Ультрафіолетове випромінювання активує і стимулює фотохімічні реакції і процеси полімерізації компонентів забруднення на поверхні захисного скла, що призводить до зміни оптичних властивостей, зменшення потоку світла, яке проступає для перетворення і як результат до зменшення електричної потужності СЕ.

2.4. Радіаційна деградація ФЕП

Аналізуючи вплив випромінювання Сонця в космосі, та орбітальне положення космічного апарату, стало зрозуміло, що вплив радіації є найголовнішою проблемою у використанні фотоперетворювачів у космосі. За рахунок того, що відбувається проникнення інтенсивних потоків частинок, у напівпровіднику та кристалічній ґратці утворюється велика кількість дефектів і зменшується час неосновних носіїв заряду, зменшується коефіцієнт корисної дії в результаті чого зменшується ефективність сонячного елемента.

Концентрація радіаційних дефектів N_r , лінійно залежить від дози радіації:

$$N_r = K_0 \cdot \Phi_0 \quad (2.1)$$

Де K_0 – число центрів, що створені на 1 см шляху пробігу кожної частинки;

Φ – сумарний потік.

Виходячи з формули (2.2) можна відстежити вплив радіації, а саме сумарну зміну часу життя носіїв та швидкість рекомбінації, що відбувається:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{K_\tau}{\Phi} \quad (2.2)$$

Де τ – час життя носіїв заряду;

τ_0 – час життя до створення радіаційних дефектів;

K_τ – коефіцієнт, що характеризує зміну часу життя при утворенні радіаційних дефектів.

Аналогічно для визначення впливу радіації на дифузійну довжину неосновних носіїв заряду можна використовувувати формулу (2.3):

$$\frac{1}{L^2} = \left(\frac{1}{L_0^2} \right) + \frac{K_L}{\Phi} \quad (2.3)$$

L_0 – дифузійна довжина до утворення радіаційних дефектів;

K_L – коефіцієнт, що характеризує зміну дифузійної довжини при утворенні радіаційних дефектів (значення вказані в табл. 3.1.). [16]

Табл 3.1. Характеристики корпускулярного випромінювання. [2]

Тип радіації	Енергія, кеВ	Потік, см ⁻² *с ⁻¹	K_L
Протони	$(1 \div 5) \cdot 10^3$	10^8	10^{-6}
	$(20 \div 200) \cdot 10^3$	10^4	10^{-7} - 10^{-5}
Електрони	$(1 \div 2) \cdot 10^3$	10^5	10^{-11} - 10^{-9}
	1-100	10^8	10^{-12} - 10^{-11}
α -частинки	Поглинаються захисним склом		

Важливо врахувати, що довжина пробігу частинки в напівпровіднику залежить від її маси та енергії. Протони низьких енергій поглинаються шаром товщиною всього лиш в декілька мікрон, а електрони високих енергій проходять через весь елемент, залишаючи дефектний слід на своєму шляху.

Життя носіїв заряду зменшується в базовій області, під впливом опромінення корпускулярними частками фотоприймача. Значення часу життя, що є вихідним складає декілька мікросекунд, якщо область легована, то

значення збільшується на 10^{-9} . У випадку коли великий потік частинок відбувається зменшення часу життя. [2]

Рухливість електронів більша рухливості дірок (розглядаються напівпровідникові матеріали) отже і дифузні довжини електронів в кремнії р-типу, що генеровані світлом, більше, ніж дірок в кремнії n-типу, кремній діркового типу більш радіаційно стійкий. Саме через це фотоперетворювачі космічного призначення мають базову область з дірковою провідністю.

Щоб визначити вплив, який спричиняють заряджені частинки на фотоперетворювач, знати енергію та вид частинки. Частинки високої енергії, наприклад, будуть зменшувати величину фотоструму червоної області спектру. Таке явище пояснюється тим, що в базі зменшується дифузна довжина носіїв. А ось частинки низьких енергій, будуть поглинуті, переважно в легованому шарі фотоперетворювача, його спектральна чутливість в короткохвильовій області, фотоефект зменшується в блакитній області.

Протони з малою довжиною пробігу мають вплив на характеристики фотоперетворювача. Відбувається радіаційне пошкодження бази, або за умови того що параметр є меншим за товщину легованого шару, то радіація призводить до того, що фоточутливість зменшується в короткохвильовій області. Фотострум створюється у тому випадку, коли відбувається збирання носіїв заряду, що помітно можна виміряти лише коли дифузійна довжина порушеного шару і його товщина є сумірними.

Фоточутливість у широкій області спектру зростає коли щільність потоків протонів зростає. Це відбувається, бо біля *p-n*-переходу в базовій області утворюється шар, що має високий питомий опір, через захоплення основних носіїв. У свою чергу в результаті, збільшується ширина об'ємного заряду, що захоплює і порушений базовий шар. Поле, що утворене забезпечує дрейфовий рух носіїв до переходу, що генеровані світлом.

Вплив електронного опромінення з утворенням дефектів по всій глибині робочої області ВАХ кремнієвих ФЕП представлено на рис 2.1.

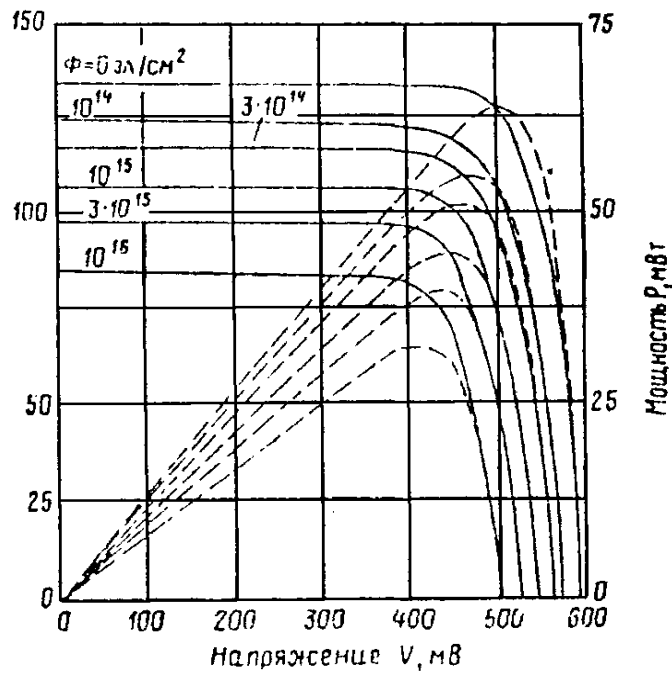


Рис. 1 Влияние электронного облучения с энергией 1 МэВ на ВАХ кремниевых ФП

Рисунок 2.1. – Вплив електронного випромінювання з енергією 1 МеВ на ВАХ кремнієвого ФЕП [7]

Струм насичення зростає, у результаті того, що дифузійна довжина та фотоЕРС зменшується, а струм зменшується через зменшення збирання носіїв. Напруга (позначена на графіку пунктиром) зменшується, через те, що зменшується вихідна потужність, саме це забезпечує нормальний режим роботи СЕ.

Існують ефективні способи для підвищення радіаційної стійкості сонячного елемента, за рахунок матеріалу бази ФЕП, що буде стійким до радіаційного випромінювання, тобто з підвищеною провідністю матеріалу при впливі як електронного, так і протонного опромінення. Але занадто велике зростання ρ бази є небажаним, бо є ризик зниження коефіцієнта корисної дії. Також важливий ступень легування, чим більше його значення, тим менше радіаційна стійкість ФЕП. Природа домішки визначає ступінь взаємодії. Ще один чинник, що дозволить зменшити радіаційну деградацію, це правильний вибір оптимальних структурних параметрів, перш за все товщини. Саме через

це, у кожному випадку необхідно розглядати різні варіанти підвищення радіаційної стійкості.

Висновки:

В цьому розділі було розглянуто вплив радіаційного випромінювання та взагалі вплив космічного середовища на сонячні елементи. Корпускулярна радіація, що міститься в космічному просторі, чинить руйнівний вплив на фотоелементи. Найбільший ефект викликають електрони з енергією $0,2 \dots 1,0 \text{ MeV}$ та протони – $4 \dots 40 \text{ MeV}$. Також велику роль у деградації фотоелектричного перетворювача, грають параметри орбіти на якій знаходиться космічний апарат з сонячними елементами.

3. КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ФЕП ТА ОСОБОЛИВОСТІ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ

3.1. Конструкція ФЕП

Приблизно 30 років конструкція ФЕП істотно не змінюється. Аналогічно до цієї конструкції виготовляють майже 75% усіх ФЕП на монокристалічному кремнії і майже 99% на мультикристалічному.

Конструкція на основі монокристалічного кремнію представлена на рис. 1.2. Р-n-перехід сформований на невеликій глибині від поверхні, х тонким металічним контактом. На тильній стороні розміщений металічний контакт. Коли на фотоприймач потрапляє випромінювання відбувається генерація дірково-електронних пар. Електрони, що згенерувались в р-шарі, переходять до р-n-перехода, та переходять в n-шар, а дірки, що згенерувались частково переносяться в р-шар. Результатом стає те, що n-шар набуває негативного заряду, а р-шар – позитивного. Між шарами р і n контактна різниця потенціалів зменшується і з'являється фотоЕРС.

Кремнієві монокристалічні фотоперетворювачі мають найвищу початкову питому енергетичну характеристику. Чутливість з двох сторін, що власне йому належить, призводить до збільшення вихідної потужності, та використовується на космічних апаратах, що низько літають.

Характерним є зниження коефіцієнта корисної дії в процесі підвищення температури, при дуже значному збільшенні концентрації сонячного випромінювання на ФЕП [8]. Та на відміну від інших характеристики сонячного елемента залежать від кількості випромінювання, що падає на його поверхню.

3.2. Технологія виготовлення сонячних елементів на монокристалічному кремнії

Ефективність сонячних елементів залежить від ефективності перетворення сонячної енергії, тому щоб ефективність СЕ була максимальною, необхідно досягти максимальної ефективності перетворення.

Технологічний процес напряму впливає на ефективність СЕ, тому щоб досягти більшої ефективності кремнієвих приладів необхідно коректувати технологічні процеси, що існують. Наприклад узгодити режим відпалу в циклі формування системи контактної металізації з параметрами емітерного шару. Також необхідно привести властивості емітерного переходу та антиблікового шару до максимального поглинання спектру сонячного випромінювання (необхідно врахувати, також, випромінювання, що поглинається атмосферою Землі). Але дуже значущим є те, що враховуючи даний спектр, в короткохвильовій частині, навіть мінімальний приріст спектральної чутливості, додає щільності фотоструму і коефіцієнта корисної дії, що дає можливість використання довгохвильового спектра АМ1.5, це відбувається у результаті фотогенерації в об'ємі ФЕП. А у випадку фотоперетворювачів призначених для використання в космосі (спектр АМ0), усе, що було викладено вище є більш суттєвим.

3.3. Оптимізація процесів дифузії фосфору для моно- та мульткристалічного кремнію

На всі вихідні параметри ФЕП має вплив такий технологічний процес, як легування фосфором пластину Si р-типу провідності з текстурованою поверхнею. Під час створення р-п переходу з глибиною залягання 0,3...0,5 мкм і досить високим рівнем поверхневої концентрації домішки ($N_D \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$),

потрібно, щоб були вирішені питання щодо отримання високої рівномірності легування на поверхні з заданим профілем легування, що в наш час є не до кінця досліджено.

Перед початком розрахунку параметрів проведення процесу дифузії в кремнієвій пластини, враховуючи його низьку якість, потрібно встановити здатність матеріалу зберігати свої властивості під температурним впливом. Час життя ННЗ в об'ємі напівпровідника дозволяє встановити цю здатність. Бо процес дифузії фосфору володіє гетеруючими властивостями (завдяки сегрегації домішок з об'єму пластини до фосфорносілікатного скла під час високотемпературної обробки), в середовищі азоту(нейтральне середовище) проводився відпал кремнієвих пластин з додаванням кисню (зادля запобігання ерозії поверхні). Дослідження проводилось на монокристалічній та мультикристалічних пластинах кремнію, з такими початковими характеристиками, що є типовими для пластин, які використовують при серійному виробництві ФЕП із кремнію для наземного призначення.

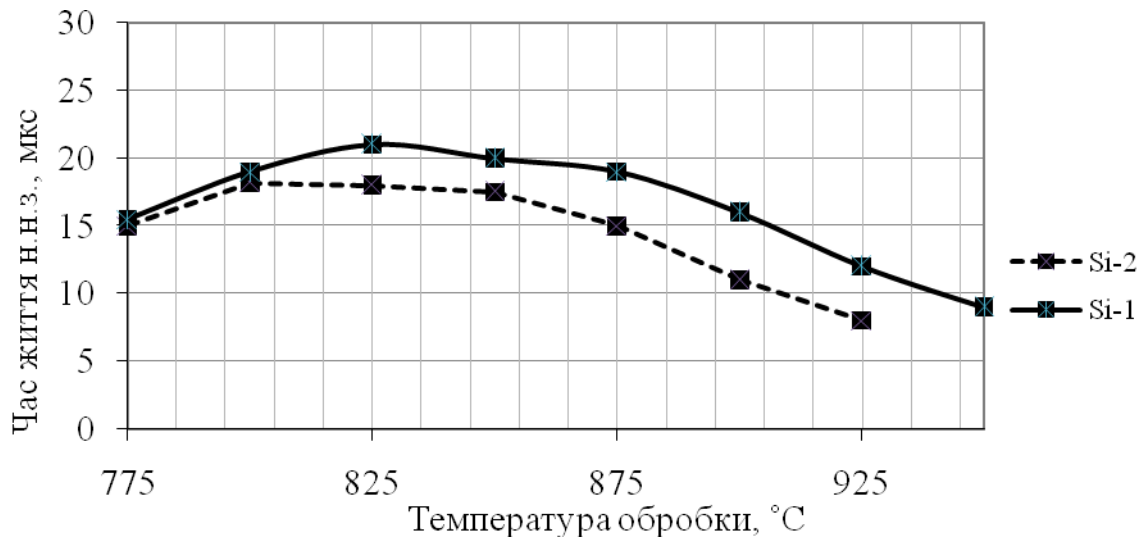


Рисунок 3.1 Динаміка зменшення часу життя ННЗ. в об'ємі монокристалічної кремнієвої пластини із вмістом вуглеця $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (Si-1) та $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (Si-2) під температурним впливом обробки. Початкове значення часу життя ННЗ – 8 мкс. [14]

Результати, що були отримані - представлені на рис. 3.1. Отримані результати вказують на те, що якість «сонячного» кремнію, призводить до зменшення $\tau_{\text{ннз}}$ при підвищенні температури більше 800 °С.

Щоб уникнути зменшення $\tau_{\text{ннз}}$ потрібно проводити дифузію фосфору при температурному діапазоні 800...850°С.

3.4. Основні положення теорії дифузії в твердому тілі

Процеси, що виникають під час ізотропної дифузії описуються через поняття коефіцієнта дифузії [7]:

$$J = -D\nabla N, \quad (3.1)$$

де: D – коефіцієнт дифузії,

J – щільність потоку атомів, що дифундують,

N – концентрація атомів, що дифундують,

∇ – оператор градієнта.

Анізотропна дифузія і коефіцієнт дифузії являє собою тензор II рангу:

$$J_i = \sum_j D_{ij} \partial N / \partial x^j. \quad (3.2)$$

Завдяки симетрії кубічної ґратки, дифузія є ізотропною, отже D - скалярна величина. Ця обставина спрощує розгляд процесів дифузії в кремнії.

Плоскопарлельний р-n-перехід частіше використовується в виробництві фотоперетворювачів. Домішка, що дифундує, має доволі малу концентрацію, тому зміни в розмірах кристалу під час дифузії, можна не враховувати. У цьому випадку системою відліку вважається кристалічна ґратка.

Для одновірної дифузії рівняння 3.1 приймає вигляд:

$$J = -D \frac{\partial N}{\partial x}. \quad \dots\dots(3.3)$$

Застосовуючи до рівняння (3.1) принцип неперервності потоку, можливо отримати рівняння для 2-го закону дифузії Фіка [14]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \nabla(D \nabla N) \quad \dots\dots(3.4)$$

для одномірного випадку:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial N}{\partial x} \right) \quad \dots\dots(3.5)$$

Якщо $\partial N / \partial x = 0$, значить, що змінні x і t – незалежні, t - постійний для різних x (D визначається в будь-який момент часу), в цьому (3.5) спрощується:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \left(D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \right), \quad \dots (3.6)$$

де N - в усіх точках має скінчене значення.

Використовуючи відповідні коефіцієнти дифузії та граничні умови, можна визначити різні дифузійні характеристики відповідно до класичної теорії дифузії. Ці характеристики являють собою – потік речовин через обрану поверхню та кількість введеної речовини в пластину за визначений час, концентрація речовин, що дифундували. Щоб визначити перелічені характеристики потрібно знати, яким є характер розподілу домішок в пластині. Просторову залежність концентрації домішки – задають граничні умови, в момент часу $t = 0$ і значення концентрації домішки чи її потоку в визначених площинах. В нормальних умовах умов при дифундуванні домішок у напівпровідник, ні одна не досягне протилежної границі, отже дифузія проходить тільки з однієї поверхні ($x=0$). Саме тому обирають модель напівбезкінечного твердого тіла, що є обмеженим площиною $x=0$.

Незалежно від концентрації всіх домішок, відбувається дифузія кожної домішки. Це видно з рівняння дифузії де D - постійна і не має членів, що відповідальні за взаємодію домішок.

3.5. Дифузія вглиб з поверхні сталої концентрації

Граничні умови домішки, що дифундує в напівнескінченне тіло через площину $x=0$, таким чином, що поверхнева концентрація N_0 постійно підтримується, можна подати у вигляді:

$$N(x > 0, 0) = 0 \quad N(0, t \geq 0) = N_0, \quad (3.7)$$

і розв'язком рівнянням (3.6) є вираз:

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}. \quad (3.8)$$

Основна домішка що не дифундує з протилежним знаком з об'ємною концентрацією N_b , у цьому випадку сумарна концентрація дорівнює:

$$N_{\text{ост}} = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} - N_b. \quad (3.9)$$

Глибина переходу x_j , де $N_{\text{ост}} = 0$, подається виразом [14]:

$$x_j = 2\sqrt{Dt} * \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{N_b}{N_0} \right). \quad (3.10)$$

З рівняння (3.8) добре видно опис розподілу домішки в напівпровіднику при дифузії з парової чи газової фази. На рис. 3.2. показано розподіл домішки для різних значень часу проведення дифузії. Для того, щоб N_0 залишалося постійним, потрібно щоб домішка, яка дифундує, мала відповідну швидкість при надходженні до поверхні. У тому випадку N_0 переходить межу розчинності

речовини речовин, що дифундують, у твердому тілі, місце мають інші процеси, тоді модель, що була описана не є дійсною.

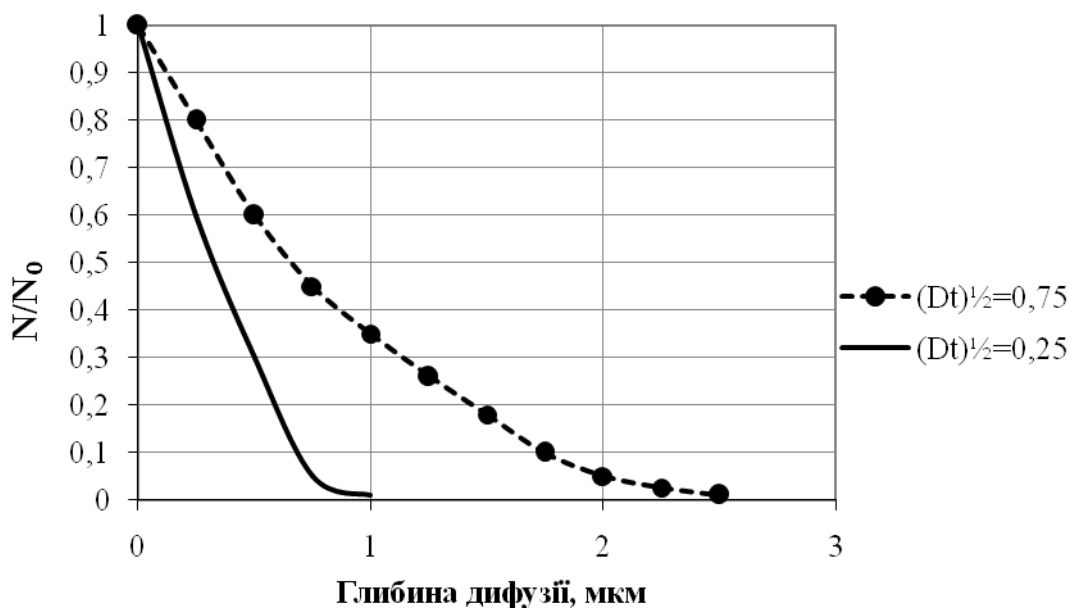


Рисунок 3.2. Дифузія з поверхні сталої концентрації.[14]

Швидкість потоку домішки через поверхню ($x=0$) визначається виразом:

$$J(t) = -D \frac{\partial N}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{DN_0}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \Big|_{x=0} = N_0 \sqrt{\frac{D}{\pi t}}. \quad (3.11)$$

Кількість речовини, за час t , що надійшла в тверде тіло, дорівнює:

$$Q = \int_0^t J(t) dt = 2N_0 \sqrt{Dt/\pi}. \quad \dots (3.12)$$

У тому випадку, коли домішка проникла на глибину більше декількох мікрон, або концентрація є невеликою, виконується рівняння (3.9). Якщо ж глибина на яку проникла домішка є незначно. чи концентрація є великою, тоді

рівняння не виконується, через те, що коефіцієнт дифузії залежний від концентрації домішки, що дифундує, та від концентрацій домішок, що вже існують (нерівномірних), ще причиною тому є те, що рівноважне значення поверхневої концентрації та його отримання вимагає скінченного часу.

3.6. Дифузія з обмеженого джерела

Абсолютна непроникність поверхні є наступним типом граничних умов. Потік домішок через поверхню $x=0$, у цьому випадку має бути обраний в нуль при всіх $t \geq 0$:

$$\left. \frac{\partial N(x, t \geq 0)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (3.13)$$

Щоб реалізувати граничні умови другого типу, необхідно щоб матеріал, який дифундує, вводився в тверде тіло перед початком дифузії. Простішим прикладом цього є дифузія із шару з рівномірним значенням початкової концентрації домішки в напівнескінченному тілі; в цьому випадку граничні умови представляють у вигляді:

$$\begin{aligned} N(x, 0) &= N_0, 0 \leq x < h, \\ N(x, 0) &= 0, x > h \end{aligned} \quad (3.14)$$

З такими граничними умовами рішенням рівняння дифузії є вираз:

$$N(x, t) = \frac{N_0}{2} \left[\operatorname{erfc} \frac{x-h}{2\sqrt{Dt}} - \operatorname{erfc} \frac{x+h}{2\sqrt{Dt}} \right], \quad (3.15)$$

(за умови, що $\operatorname{erfc}(-v) + \operatorname{erfc}(v) \equiv 2$).

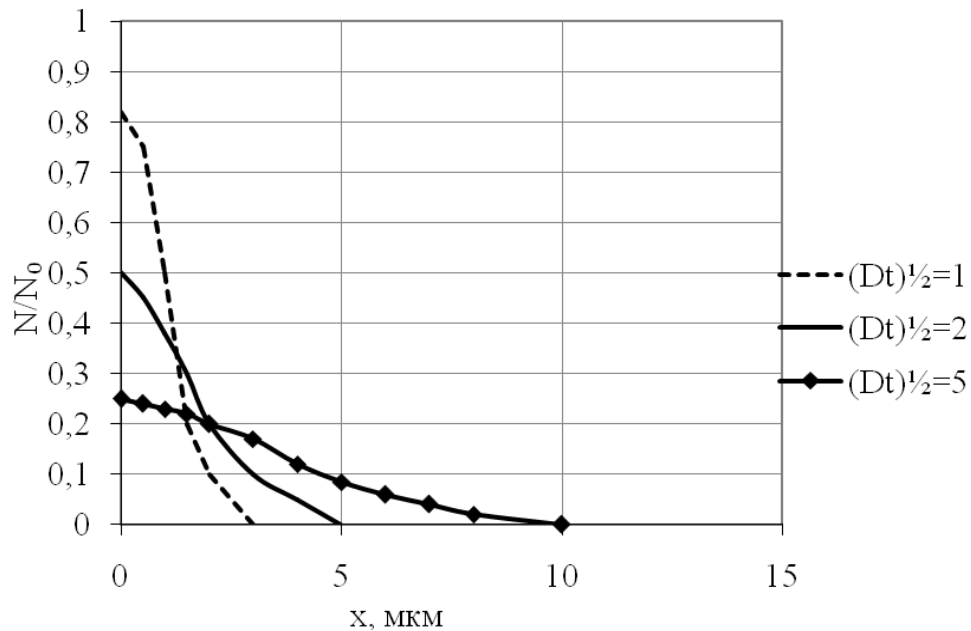


Рисунок 3.3 Дифузія з обмеженого джерела. При $t=0$ розподіл негаусовий для всіх значень x ; при $\sqrt{Dt}=1$ розподіл Гаусів для $0 < x < 1$; при $\sqrt{Dt}=2$ розподіл Гаусів для $0 < x < 4$. [14]

На рис. 3.3 показаний вид цієї функції (при $h=1$). Поверхнева концентрація зменшується з часом:

$$N(0, t) = N_0 \left(1 - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right). \quad (3.16)$$

Якщо розкласти в ряд Тейлора поблизу точки $x/2\sqrt{Dt}$ праву частину, отримаємо:

$$N(x < \frac{Dt}{h}, t > \frac{h^2}{D}) \approx \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp \left[- \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)^2 \right], \quad (3.17)$$

де $Q \equiv N_0 h$ - загальна кількість домішки в твердому тілі в кожен момент часу.

Звідси поверхнева концентрація дорівнює:

$$N(0, t > \frac{h^2}{D}) \approx \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} < N_0, \quad (3.18)$$

це відповідає рівнянню (3.16). А рівняння (3.17) є розподілом Гауса по координаті x .

Всі моделі дифузії фосфору будувались на основі результатів, отриманих при проведенні досліджень за температур, що вище за припустимі для сонячного кремнію. [14] Досліджений діапазон температур дифузії фосфору 700-1300°C, а один з етапів дифузії проводився при - 1000-1300°C, це неможливо вважати низькотемпературною (менш ніж 900°C) дифузією фосфору.

Якщо порівнювати реальний процес дифузії з рідкого джерела фосфору в потоці газа-носію з моделями, що є класичними, можна зробити висновок, що за реальних умов, умови, що прийняті в моделях, як початкові, не виконуються. Процес дифузії, що проходить в реальності, відбувається лише за умов, що на поверхні пластини створенно шар фосфорносілікатного скла що є нескінченним (як для рівня концентрації в пластині) джерелом дифузії. Поверхнева концентрація фосфору збільшиться за умов збільшення часу проведення дифузії (рис. 3.4).

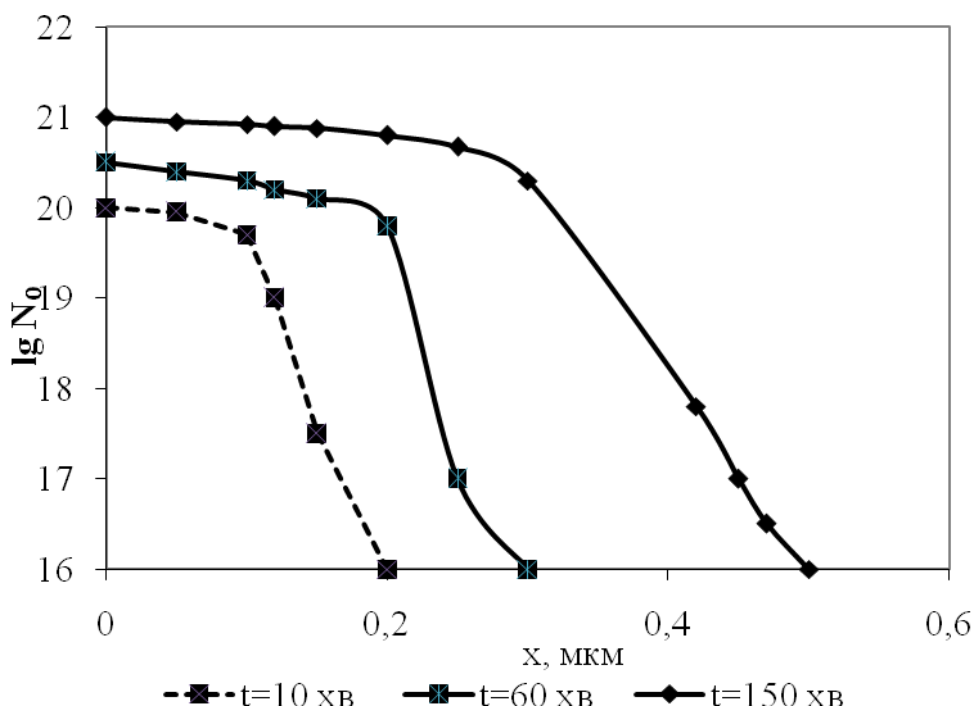


Рисунок 3.4. Профілі розподілу фосфору в кремнієвій пластині в залежності від часу проведення процесу. Процес проведено в пластині з полірованою поверхнею марки КДБ-1 в ДВСЕіМ ВАТ «Квазар». Профіль розподілу домішки отримано за допомогою методу ВІМС. [14]

Отже теоретично розглядаючи основні положення теорії дифузії, необхідно відмітити наступні обмеження, якщо використовувати класичні моделі, та застосовувати їх для створення емітерного шару фотоперетворювача:

1. Температурний діапазон проведення процесу дифузії - $1000-1200^{\circ}\text{C}$, а температура обробки пластин кремнію - нижче 900°C .

2. Глибина залягання емітерного переходу - $0,3-0,5$ мкм.

3. Варіант перебігу процесу дифузії, у випадку, що проміжне джерело дифузії (шар фосфорносілікатного скла) залишиться на поверхні пластини під час процесу.

4. Врахувати вплив стану поверхні на швидкість дифузії що є досить актуально (бо пластин не підлягає шліфовці і поліровці).

Оскільки виробництво ФЕП, передбачає роботу на глибинах дифузії меншої за 1 мкм, неможливо визначити апріорну теоретичну базу особливих механізмів дифузії. Щоб встановити основні параметри впливу на сам процес дифузії, часових та температурних залежностей проведено експериментальне дослідження параметрів емітерного шару, що створювався допомогою дифузії фосфору в потоці газа-носія з рідкого джерела. Матеріали, режими процесів та обладнання використовувались такі, як використовуються при виготовленні ФЕП на кристалічному кремнії.

3.7. Дифузія фосфору при створенні електронно-діркового переходу для фотоелектричного перетворювача

Основні вимоги, що пред'являються до процесу дифузії в умовах серійного виробництва:

1) рівномірність заданих параметрів (глибина, концентрація) по пластині, від пластини до пластини в партії і від партії до партії;

- 2) задані профіль легування фосфору і рівень гетерування фонових домішок;
- 3) мінімальний час проведення процесу;
- 4) максимальна кількість пластин при одночасній обробці.

Щоб досягнути високих технічних характеристик ФЕП і високої продуктивності потрібно щоб були забезпечені стабільні умови проведення технологічного процесу.

Дифузію фосфору переважно проводять використовуючи рідкі джерел POCl_3 або PCl_3 . Під час створення емітерного шару особливістю є наявність текстурованої поверхні, наприклад як на зображенні рис. 3.15. Рельєфна поверхня сприяє зменшенню коефіцієнта відбиття світла і збільшенню площі поверхні, що є фотоактивною. Текстурування поверхні кремнію р-типу, з орієнтацією (100), виготовлена травленням в лужних розчинах. Висота пірамід знаходиться в діапазоні 3...7 мкм.

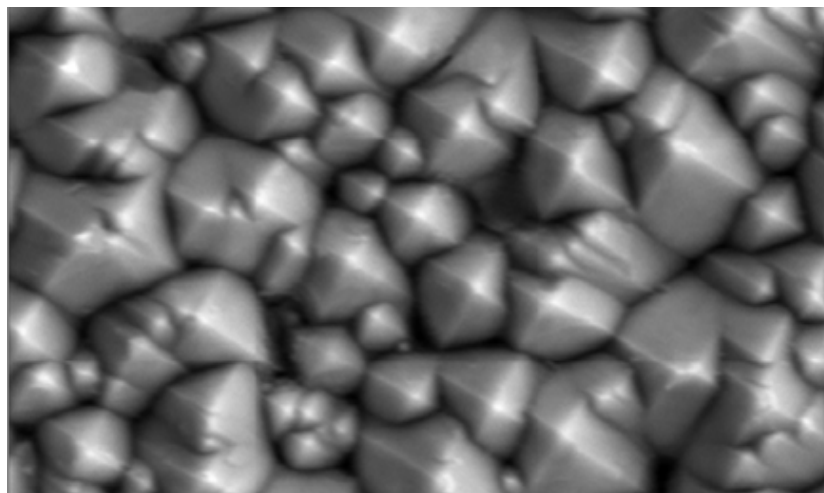
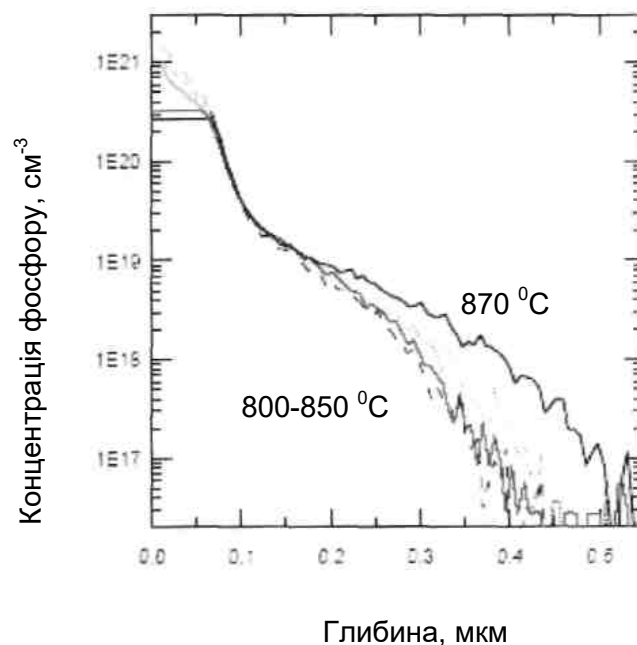


Рисунок. 3.5 - Текстурована поверхня монокристалічного кремнію

(знімок за допомогою РЕМ). [14]

Дифузія фосфору проводилася у відкритій системі (з джерелом POCl_3) в кремнієві пластини монокристалічного кремнію при температурах 800°C ... 870°C.

Експеримент показав що, процес дифузії фосфору не описується законом Фіка при вказаних температурах та проведенні дифузії з обмеженого і нескінченного джерела. Крім того, стан поверхні і механічна напруга впливають на коефіцієнт дифузії. На рис. 3.6 представлено профілі розподілу фосфору, що отримані методом вторинної іонної мас-спектроскопії (ВІМС). Розподіл фосфору практично не залежить від температури в області глибини дифузії 0,1...0,2 мкм, а в діапазоні 0,3...0,6 мкм при температурі 870°C виникає відмінність.



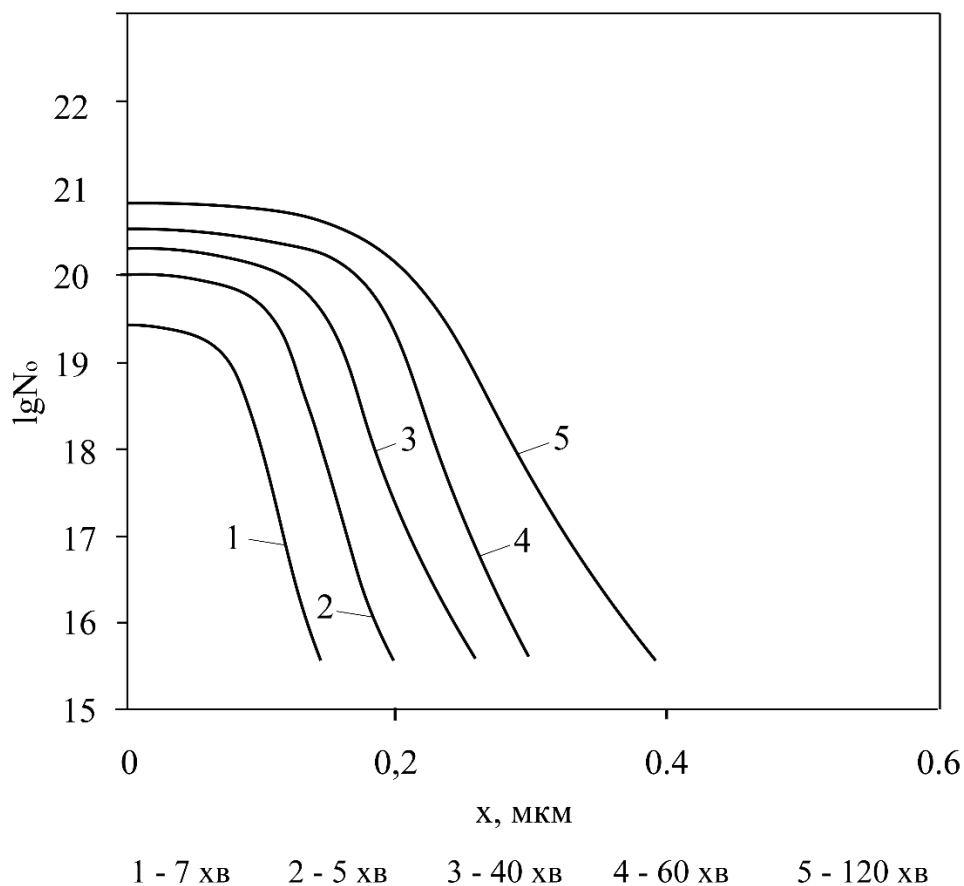


Рисунок 3.14. Профілі розподілу фосфору в кремнієвій пластині в залежності від часу проведення процесу, отримані за допомогою методу ВІМС. [14]

Висновки:

У даному розділі було розглянуте конструктивне представлення ФЕР на основі монокристалічного кремнію та процес дифузії фосфору для моно- та мультикристалічного кремнію. Створення ефективних конструкцій ФЕР, дозволяє отримувати доступ без меж до Сонця, як до джерела енергії. Збільшення значення ККД потребує зміни параметрів р-п-переходу. Також були розглянуті варіанти оптимізації процесу дифузії, вимоги та особливості, що виникають під час цього процесу.

4. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕП

4.1. Методика досліджень параметрів СЕ.

Еквівалентна схема ФЕП на кристалічному кремнії з урахуванням послідовного та шунтуючого опорів, а також опору навантаження представлена на рис. 4.1.

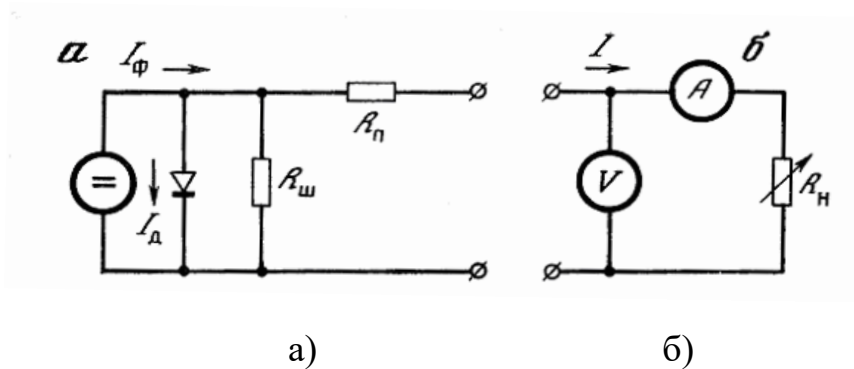


Рисунок - 4.1 Еквівалентна (а) та вимірювальна (б) електричні схеми ФЕП.

У цьому випадку ВАХ може бути описана формулою:

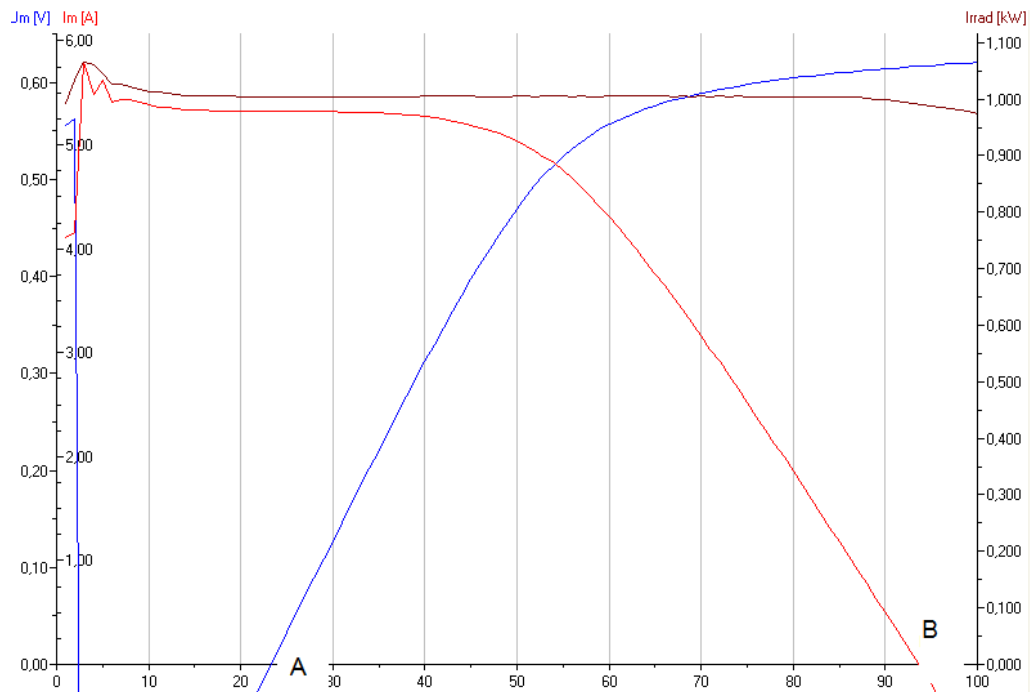
$$I = I_0 \left(\exp \left[\frac{q(V - IR_n)}{nkT} \right] - 1 \right) + \frac{V - IR_n}{R_{ш}} - I_\phi. \quad (4.1)$$

Або в іншому представленні:

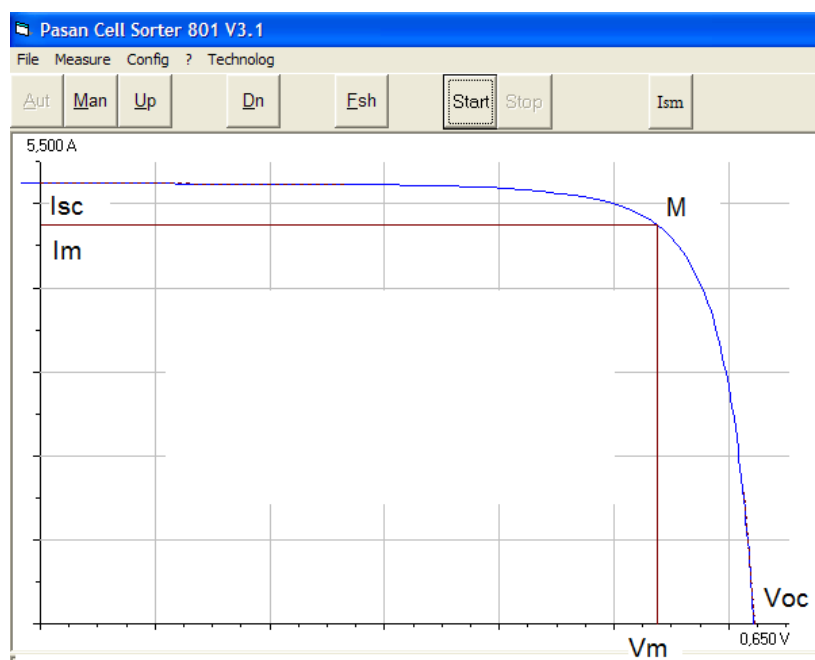
$$\ln \left(\frac{I + I_\phi}{I_0} - \frac{I - UR_n}{I_0 R_{ш}} + 1 \right) = \frac{q}{nkT} (U - IR_n). \quad (4.2)$$

Розглянемо формування виразу для визначення ККД ФЕП.

Типова ВАХ напівпровідникового ФЕП, яка описується виразом (4.2), представлена на рис. 4.2.б.



а)



б)

Рисунок 4.2 ВАХ ФЭП. Вимірювання проводилися на тестері ФЭП СТ-801:

- а) дані, що безпосередньо вимірювалися тестером ФЭП;
- б) результуюча ВАХ, яка побудована за програмою обробки тестера.

Вимірювання ВАХ проводять опроміненням ФЕП світлом з розподілом АМ1.5, з щільністю потоку опромінення 1000 Вт/м^2 , при температурі оточуючого середовища 25°C (стандартні умови вимірювань). При цьому змінюють опір навантаження від нуля до нескінченності. Потому, як збільшується величина опору навантаження, напруга V на ФЕП монотонно збільшується (синя крива на рис 4.2.а) і досягає значення напруги холостого ходу (точка V_{oc} на рис.3.2. б), формулою розрахунку якої є наступний вираз:

$$V_{xx} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_\phi}{I_o} + 1\right). \quad (4.4)$$

Струм у зовнішньому колі (I) при збільшенні опору навантаження спочатку змінюється повільно (червона крива на рис 4.2.а), залишаючись майже на рівні струму короткого замикання. Потім відбувається стрімке зниження величини цього параметру до нуля. На ВАХ існує точка M (рис 4.2.б), в котрій потужність P_m , що віддається ФЕП у зовнішнє коло, є максимальною і рівною площі виділеного на рис.4.2.б прямокутника:

$$P_M = I_M V_M. \quad (4.5)$$

Коефіцієнт заповнення ВАХ чи фактор заповнення FF , що рівний відношенню $I_M \cdot V_M$ до $I_{кз} \cdot V_{xx}$, характеризує внутрішні втрати в ФЕП:

$$FF = \frac{I_M V_M}{I_{кз} V_{xx}}. \quad (4.6)$$

В результаті, коефіцієнт корисної дії η напівпровідникового ФЕП може бути представлений як співвідношення максимальної потужності, що віддається ФЕП у зовнішнє навантаження, до повної потужності сонячного випромінювання, що падає на поверхню перетворювача:

$$\eta = \frac{I_M V_M}{P_u} = FF \frac{I_{кз} V_{xx}}{P_u} \quad (4.7)$$

4.2. Дослідження фотовольтаїчних характеристик ФЕП

Виміри основних параметрів ФЕП, що досліджувалися були проведені на тестері ФЕП СТ-801. Вимірювання ВАХ проводять опроміненням ФЕП світлом з розподілом АМ1.5, з щільністю потоку опромінення 1000 Вт/м^2 , при температурі оточуючого середовища 25°C (стандартні умови вимірювань). При цьому змінюють опір навантаження від нуля до нескінченності.

Вимір вольт-амперних характеристик, дозволяє визначити чисельні значення параметрів, що і є однією з задач даної роботи. По вимірній ВАХ, можливо визначити такі параметри, як:

- FF – коефіцієнт заповнення;
- КПД сонячного елемента;
- U_{oc} - напругу холостого ходу;
- I_{sc} – струм короткого замикання;
- R_{sh} – шунтуючий опір;
- R_{se} – послідовний опір.

На рисунках 4.3 - 4.10 приведені типові характеристики виготовлених зразків ФЕП. Розраховані параметри елементів приведено у таблиці 4.1.

Табл. 4.1. - Типові параметри виготовлених елементів

Зразок	I_{sc} , A	U_{oc} , V	Eff, %	FF, %	MPP, W	U_{mpp} , V	I_{mpp} , A	R_{ser} , Ohm	R_{sh} , Ohm
02-01	1,15	0,620	16,81	77,48	0,597	0,586	1,02	0,056	17,541
02-03	1,12	0,615	16,66	77,07	0,609	0,57	1,07	0,0057	154,962
03-04	1,26	0,625	17,86	79,04	0,649	0,613	1,06	0,0055	40,613
03-08	1,22	0,624	17,63	78,40	0,655	0,607	1,08	0,0051	179,221
04-12	1,26	0,621	18,40	79,20	0,693	0,614	1,13	0,0036	141,774
04-13	1,28	0,629	18,38	79,84	0,701	0,615	1,14	0,0033	981,100
12-03	1,32	0,625	19,66	80,07	0,698	0,597	1,17	0,0057	187,962
12-07	1,41	0,647	19,7	80,27	0,862	0,639	1,35	0,0054	84,537

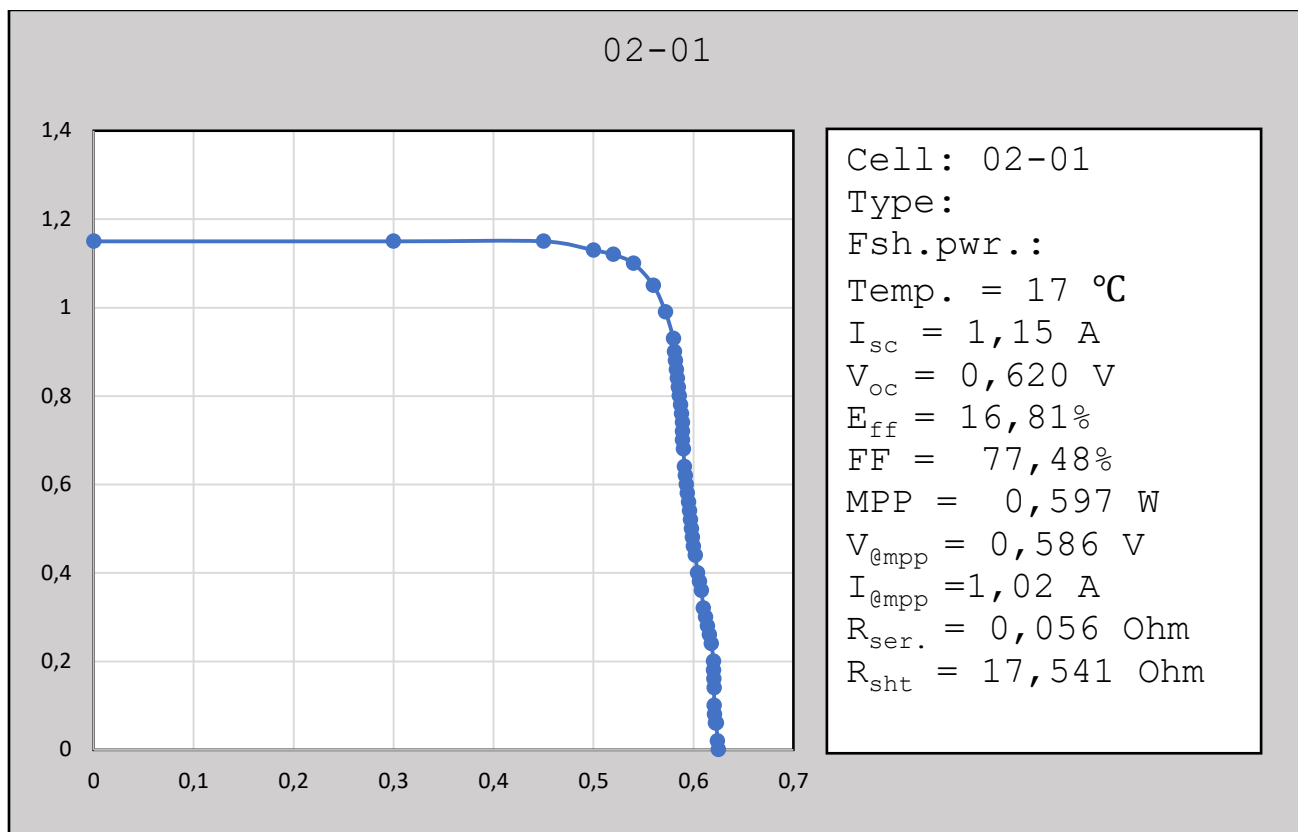


Рисунок 4.3 – Основні параметри та ВАХ зразка 02-01

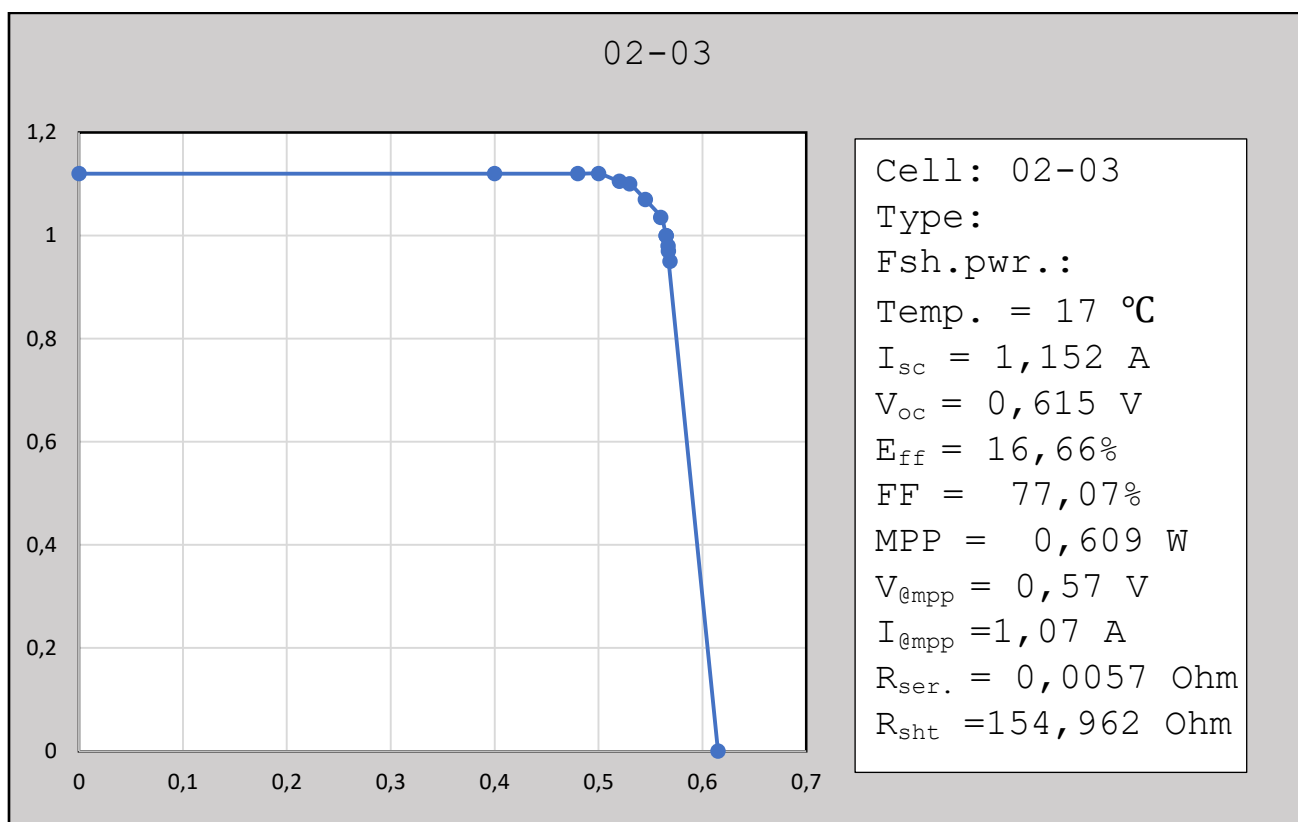


Рисунок 4.4 - Основні параметри та ВАХ зразка 02-03

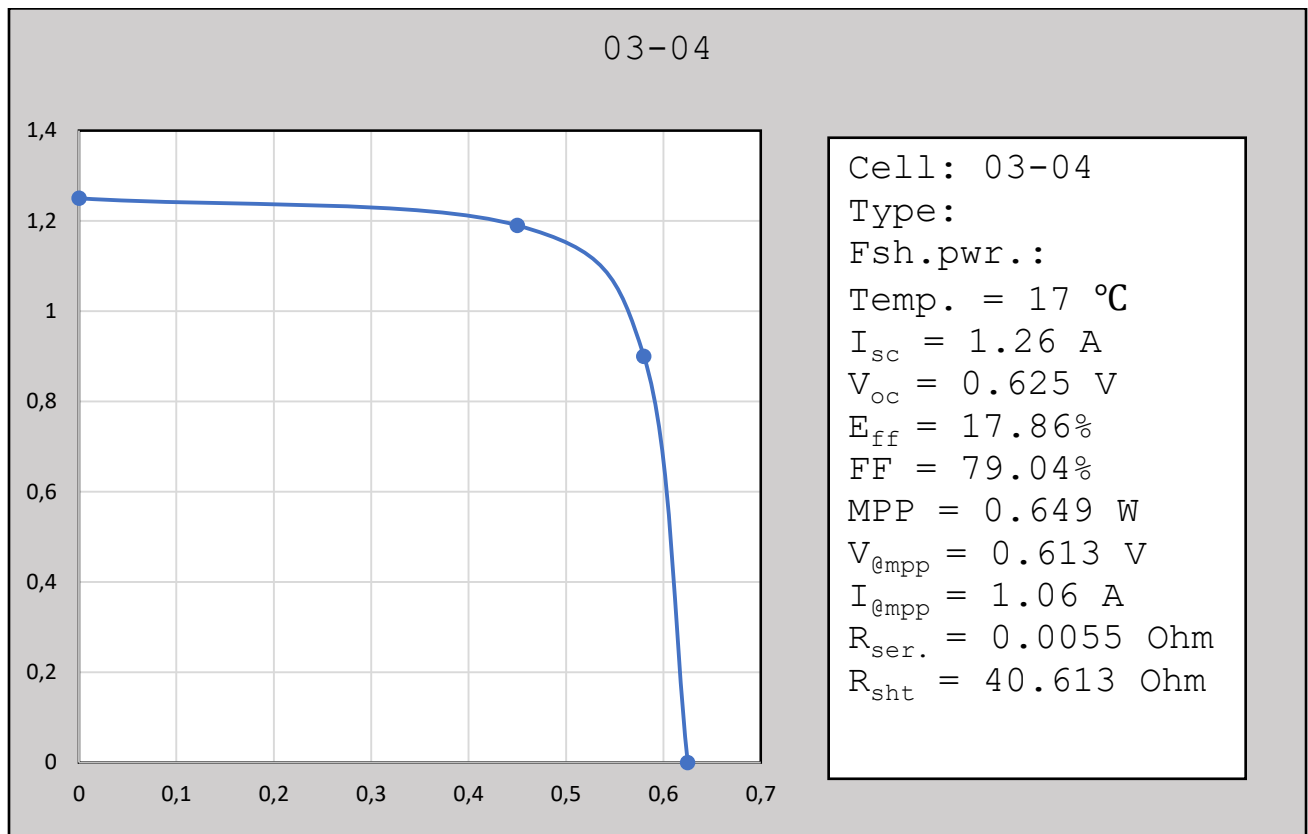


Рисунок 4.5. - Основні параметри та ВАХ зразка 03-04

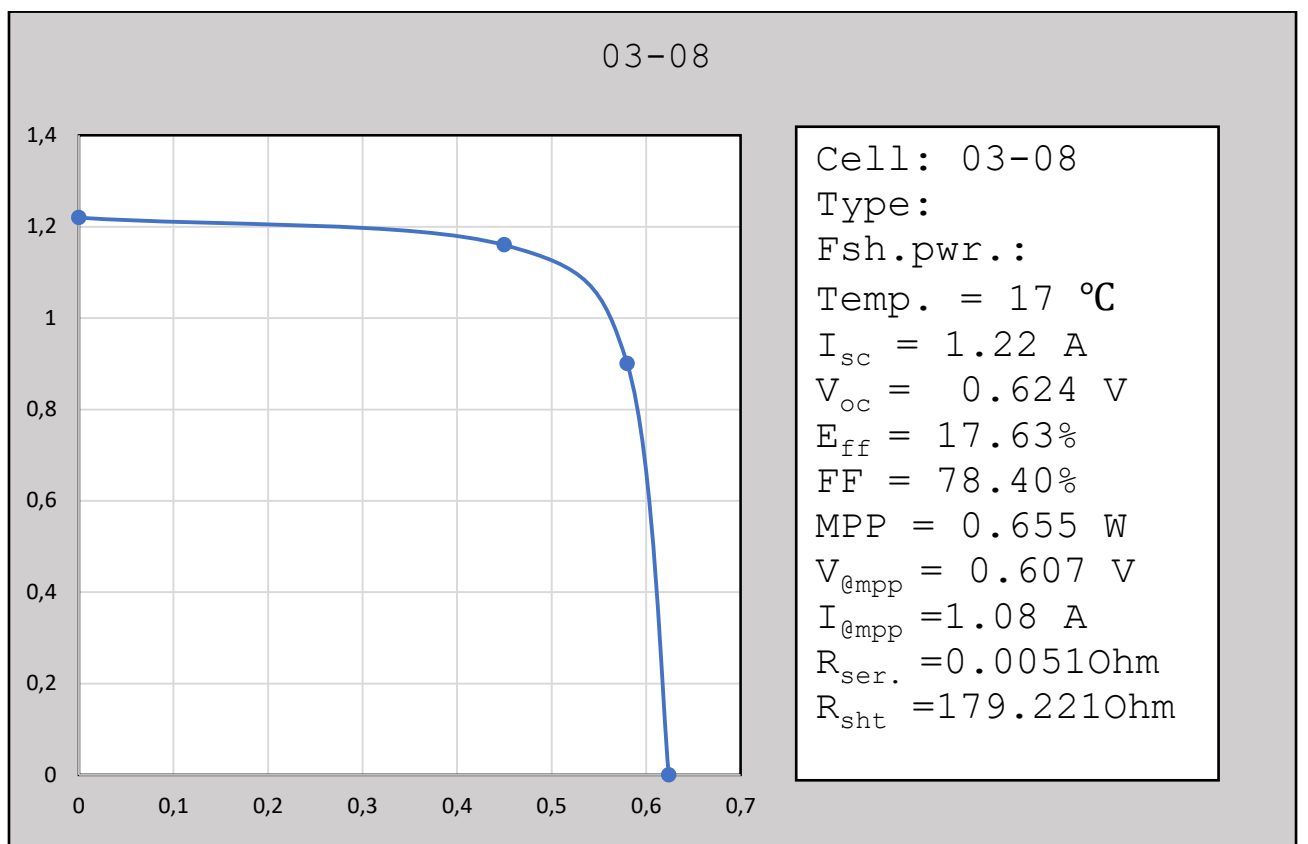


Рисунок 4.6. - Основні параметри та ВАХ зразка 03-08

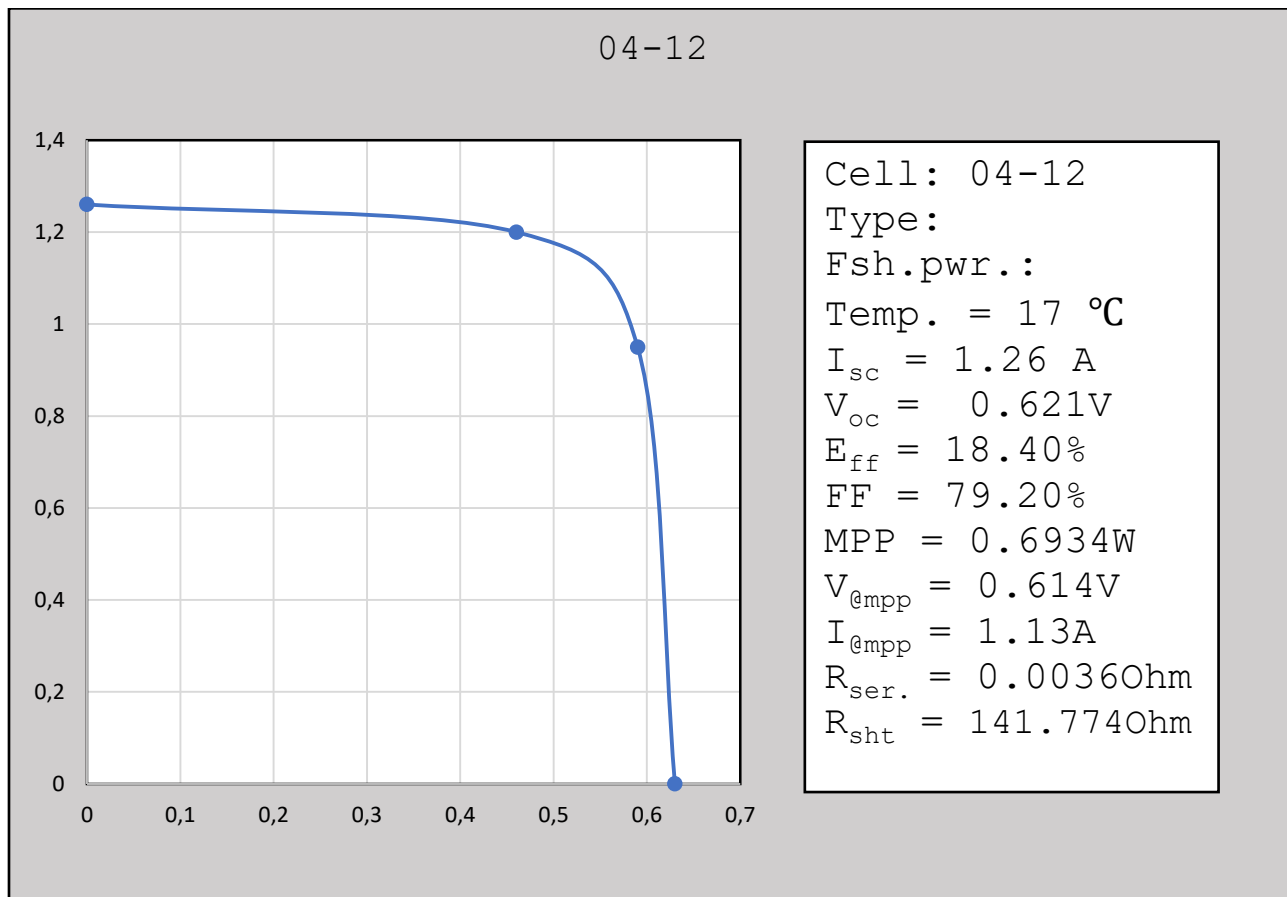


Рисунок 4.7. - Основні параметри та ВАХ зразка 04-12

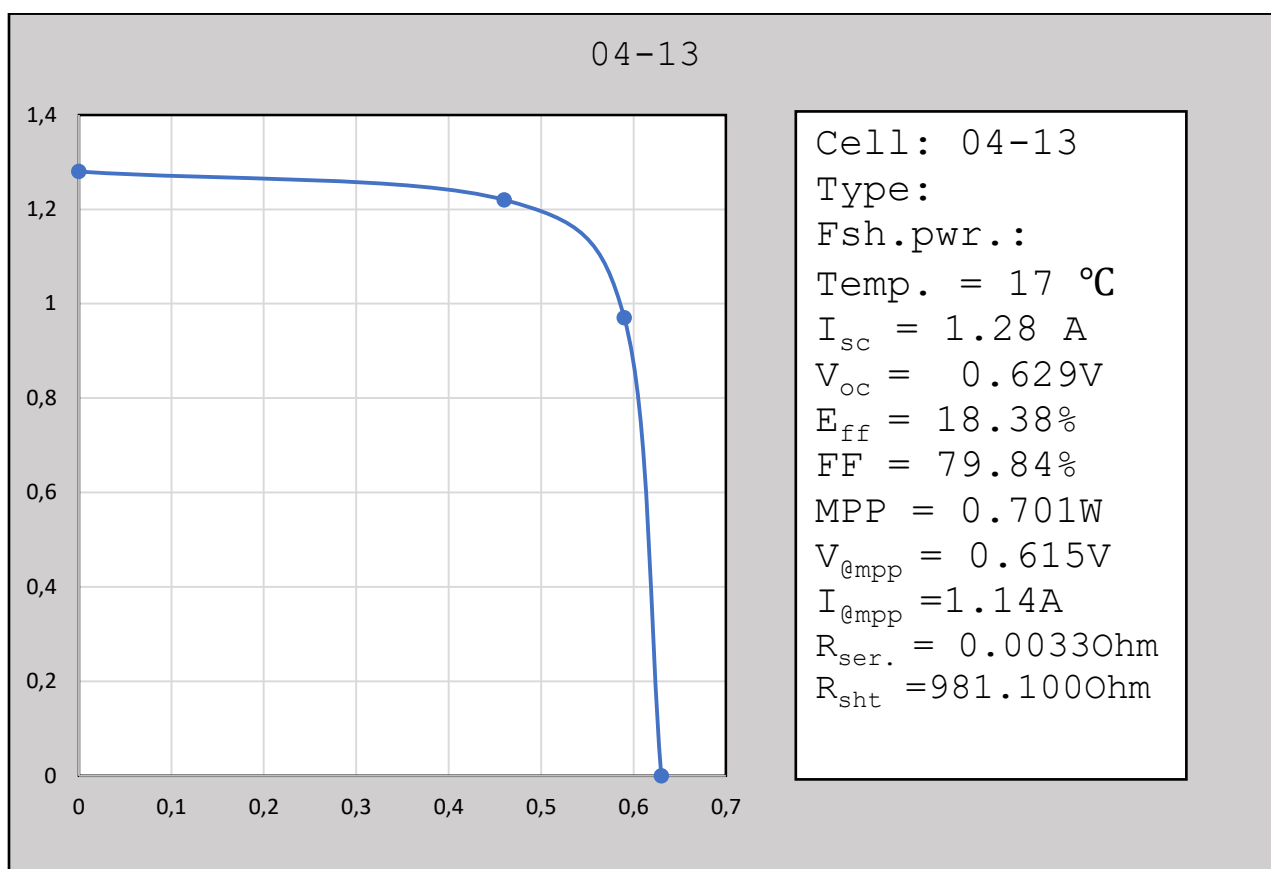


Рисунок 4.8. – Основні параметри та ВАХ зразка 04-13

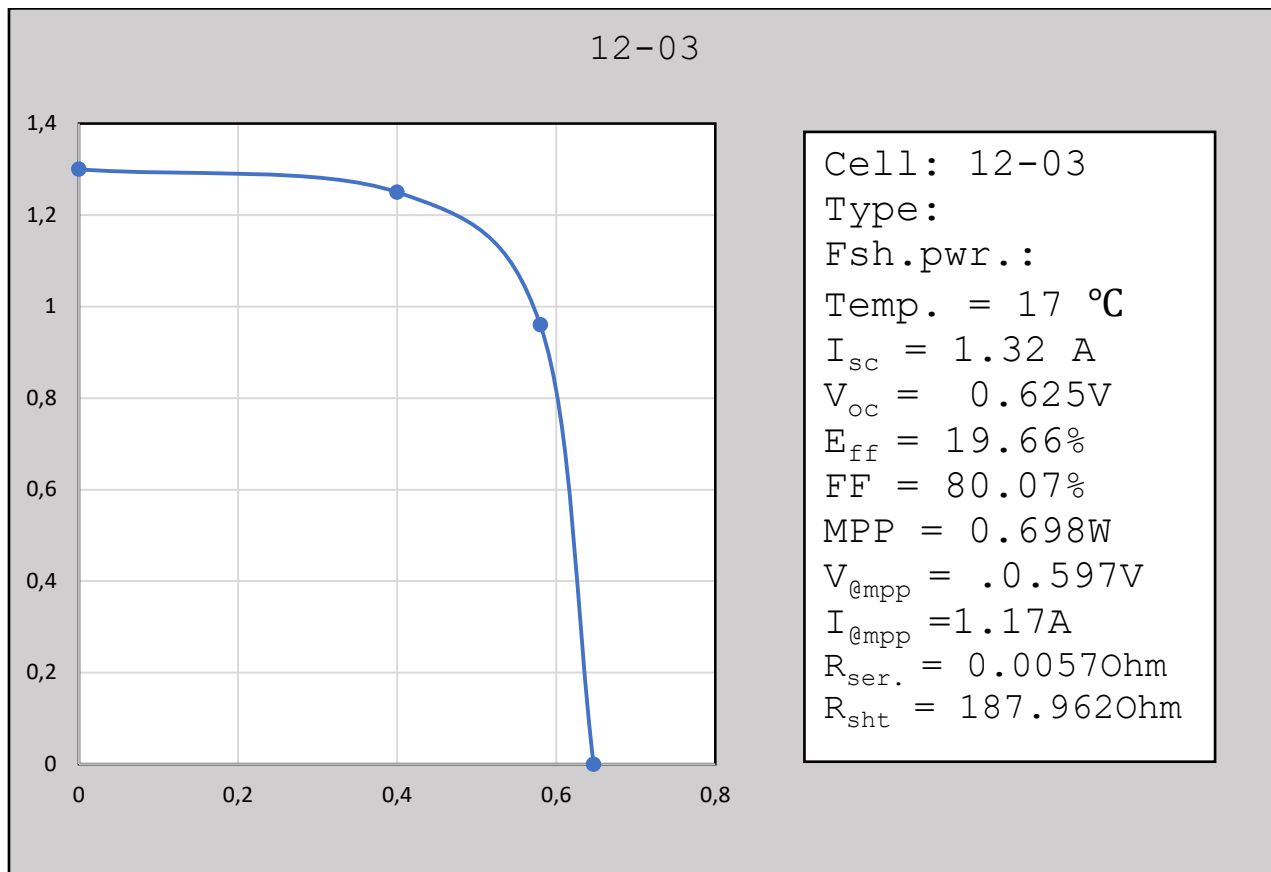


Рисунок 4.9. - Основні параметри та ВАХ зразка 12-03

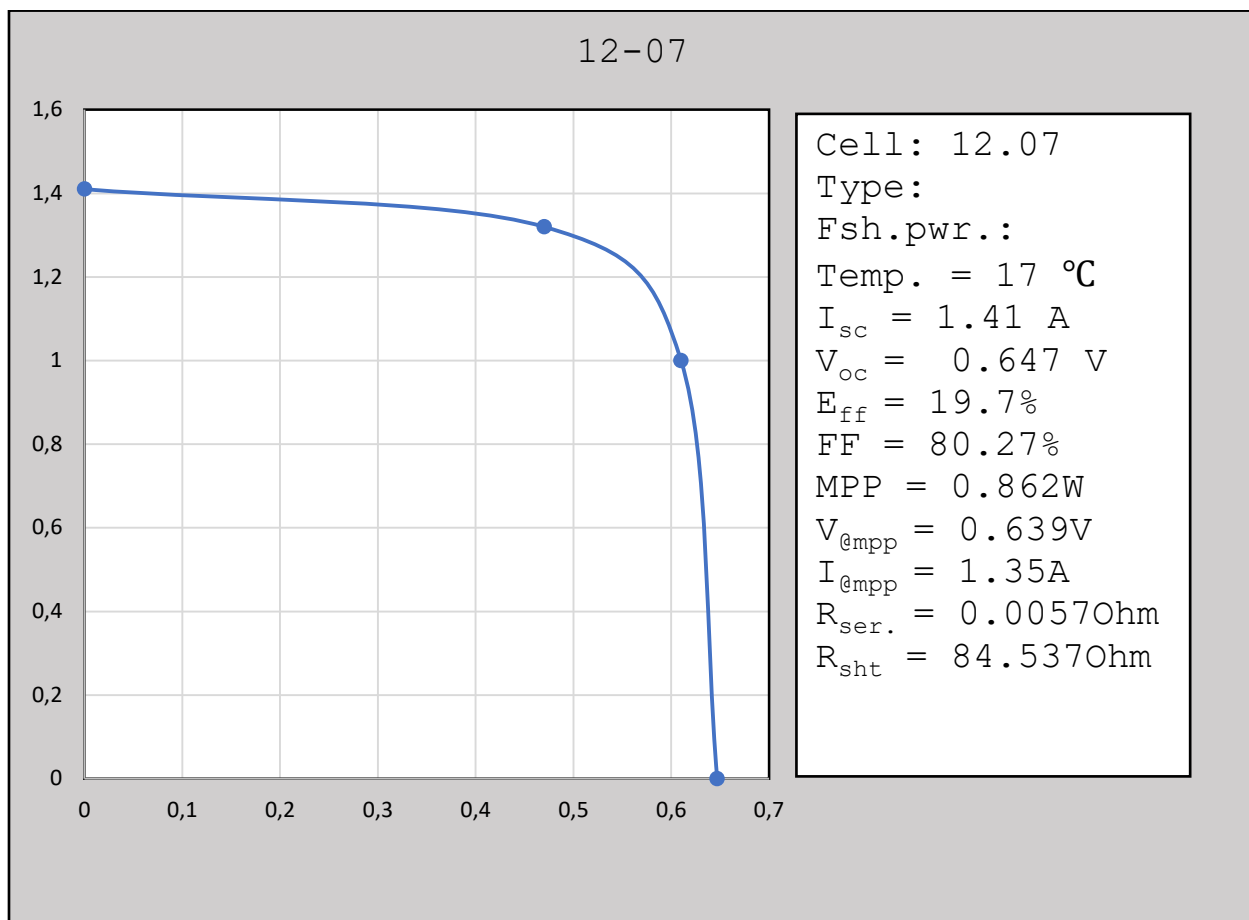


Рисунок 4.10. - Основні параметри та ВАХ зразка 12-07

Як бачимо кращим досліджуваним зразком виявився 12-07 – його $\text{ККД} = 19.7\%$, $\text{FF} = 80.27\%$, $I_{\text{sc}} = 1.41 \text{ A}$, $V_{\text{oc}} = 0.647 \text{ V}$.

4.3. . Дослідження спектральних характеристик ФЕП

На рисунку 4.11 приведені спектральні характеристики виготовлених зразків ФЕП.

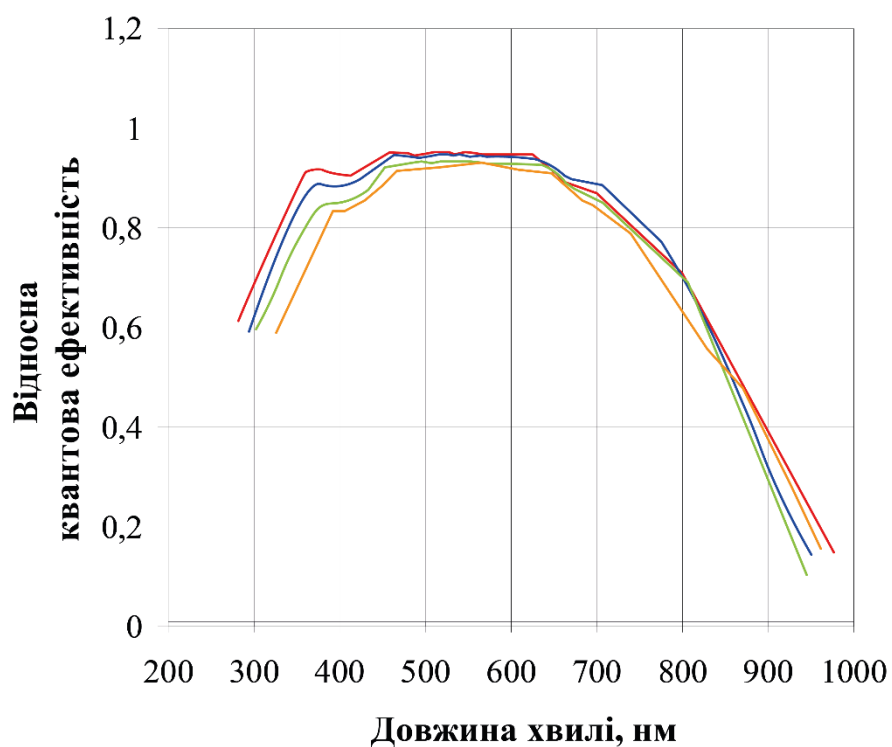


Рисунок 4.11. – Спектральні характеристики експериментальних фотоприймачів.

Під час дослідження спектральних характеристик сонячних елементів, було виявлено, що інтервал чутливості на сонячне випромінювання елементів знаходиться в області від 300 нм до 450 нм. Максимум, що досягається – 450-650 нм. Із отриманих результатів видно, що наявність мілкозалегаючого р-n-переходу, що був отриманий дифузією фосфору, забезпечує підвищення в ультрафіолетовому діапазоні спектральної чутливості кремнієвого

фотоперетворювача. За рахунок цього поліпшується ККД і ефективність перетворення.

Висновки:

У цьому розділі представлені вольт-амперні характеристики та характеристики спектральної чутливості досліджуваних ФЕП. Аналізуючи отримані данні, можна стверджувати, що удосконалення технології, яка використовувалась дозволяє суттєво розширити діапазон спектральної чуттєвості кремнієвих фотоперетворювачів . В космосі вплив УФ буде суттєвішим, тому ФЕП з мілко залягаючим р-n переходом доцільно використовувати для космічних апаратів

ВИСНОВКИ

В даній роботі були проаналізовані параметри та фактори, які впливають, позитивно чи негативно, на ефективність роботи та перетворення сонячного випромінювання в сонячних елементах. В вплив конструкції та технології виготовлення на параметри ефективності ФЕП

Встановлено, що для поліпшення ефективності роботи кремнієвих ФЕП для космічних апаратів потрібно поліпшувати чутливість в УФ діапазоні. Для розширення спектру чутливості в УФ діапазоні випромінювання та підвищення ефективнішого перетворення сонячної енергії, було удосконалено технологію, завдяки якій, СЕ формувався з мілко залягаючим *p-n*-переходом.

Отримані параметри: коефіцієнт заповнення – 80,27% , питома потужність – 0,862 Вт, напруга розімкненого кола – 0,647 В, струм короткого замикання – 1,14 А, коефіцієнт корисної дії – 19,7%, повністю задовольняють вимогу ФЕП для розробки сонячних батарей космічного призначення для супутника PoliTAN -3.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ

1. Кремниевые фотопреобразователи для космической и авиационной отрасли, 2012 Г.П. Яровой, Н.В. Латухина, А.С. Рогожин¹, А.С. Гуртов, С.В. Ивков, С.И. Миненко.
2. Н.В. Белан, К.В. Безручко, В.Б. Елисеев, В.В. Ковалевский, В.А. Летин, В.Н. Постановов, А.Н. Федоровский, Бортовые энергосистемы космических аппаратов на основе солнечных и химических батарей: учебное пособие – Харьковский авиационный институт: 1992. – 191 с.
3. Крейнин, Л. Б. Солнечные батареи в условиях воздействия космической радиации / Л. Б. Крейнин, Г.М. Григорьева – М.: ВИНТИ, 1979. – 128 с. 27
4. Tribble A. C., Boyadjian B., Davis J. Contamination control engineering design guidelines for aerospace community // NASA Contractor Report. — 1996. — N 4740. — 126 p.
5. Dever J. A., Bruckner E. J., Scheiman D. A. Contamination of space environmental effects on solar cells and thermal control surfaces // J. Spacecraft and Rockets. — 1995. — 32, N 5. — P. 832—838.
6. Leet S. J., Fogdal L. B., Willkinson M. C. Thermo-optical property degradation of irradiated spacecraft surfaces // J. Spacecraft and Rockets. — 1995. — 32, N 5. — P. 832—838.
7. А.Фаренбрух, Р. Бьюб, «Солнечные элементы. Теория и эксперимент/ Пер. с англ. Под ред. М.М. Колтуна. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280с.
8. Андреев, В.М. Гетероструктурные солнечные элементы // Физика и техники полупроводников, 1999. – Т. 33, вып. 9 – С. 1035 – 1038. 15
9. Раушенбах Г. «Справочник по проектированию солнечных батарей» Пер с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983 – 360с.
10. Rentechno [Електронний ресурс]: Articles/Si-solar-cell-technology. - <http://retechno.ua/ua/articles/si-solar-cell-technology.html>

11. Conebeer, G. Silicon nanostructures for third generation photovoltaic solar cells. / G. Conebeer, M. Green, R. Corkish et al. // Thin Solid Films. 2006. V. 511-512. P. 654-662.
12. Lenta.ru: Новости: КПД солнечных батарей достиг рекордного значения <http://lenta.ru/news/2007/07/25/solar/> 14.03.2008
13. Ritter E.S. Comparison of silicon solar cell for space and terrestrial use E.S. Ritter, R.A. Arndt // J. Appl. Phys. – 1976. Vol. 47. – P.2999 – 3004.
14. То что на почте висит
15. Глиберман А.Я., Зайцева А.К. «Кремниевые солнечные батареи», М – Л., Госэнергоиздат 1961, 72 с.
16. Забродский В.В., Аруев П.Н., Белик В.П. и др. Исследование стабильности кремниевых фотодиодов в вакуумном ультрафиолете // Физика и техника полупроводников. 2013. Т.47. Вып. 2. С.178-181.
17. Полупроводниковые фотоприемники / Под ред. В.И.Стафеева. М.: Радио и связь, 1984. 216 с.
18. Павлык Б.В., Слободзян Д.П., Грыпа А.С. и др. Совершенство поверхности кристаллов p-Si и радиационно стимулированные изменения характеристик поверхностно-барьерных структур Bi-Si-Al // Физика и техника полупроводников. 2012. Т.46. Вып. 8. С.1017-1021:
19. Гаврушко В.В., Ионов А.С., Ласткин В.А. Кремниевые фотоприемники с высокой чувствительностью к УФ излучению // Датчики и системы. 2009. №6 (121). С.49-51.